

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ HORKOVZDUŠNÉHO MODELU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ŠIMURDA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ HORKOVZDUŠNÉHO MODELU

CONTROL OF HOT AIR TUNNEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ŠIMURDA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BLAHA, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jan Šimurda

ID: 134629

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Řízení horkovzdušného modelu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- seznámte se s existujícím přípravkem horkovzdušného tunelu, s prostředím LabView a s jeho použitím pro řízení systémem CompactRIO,
- navrhnete a realizujete propojení přípravku se systémem CompactRIO a jeho vstup výstupními moduly (náhrada existujících výkonových zesilovačů moduly s pulsně šířkovou modulací)
- vytvořte model přípravku v prostředí Matlab Simulink (případně v LabView Control Design and Simulation),
- naprogramujte řízení horkovzdušného tunelu (řízení teploty baňky žárovky), které odzkoušíte nejprve v simulaci a následně na reálném přípravku pomocí systému CompactRIO,
- navrhnete laboratorní úlohu pro návrh reléového regulátoru a regulátoru typu PID horkovzdušného tunelu. Zadání, teoretický úvod a vzorové vypracování uveďte v příloze bakalářské práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Soederstrom, T., Stoica, P.: System identification. Prentice Hall International, 1989.
[2] Žídek J.: Grafické programování ve vývojovém prostředí Labview, VŠB-TU Ostrava, říjen 2002.

další dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přestavbou modelu horkovzdušného tunelu pro řízení pomocí systému CompactRIO od společnosti National Instruments. Pro komunikaci s tunelem bylo navrženo uživatelské prostředí, které uživatele provede identifikací soustavy a návrhem regulátoru, který si odzkouší nejdříve na simulaci, a potom na skutečném zařízení. Výsledkem práce je sestavení školní úlohy, do které jsou jednotlivé dílčí postupy implementovány.

KLÍČOVÁ SLOVA

CompactRIO, LabVIEW, Horkovzdušný tunel

ABSTRACT

This bachelor thesis is dealing with the reconstruction of hot-air tunnel model for management using CompactRIO system from National Instruments company. For a communication with the tunnel has been designed a user interface that guides a user through the system identification and controller design, which is testable as a simulation and then on a real device. The result of this thesis is to create a school task implementing the particular procedures.

KEYWORDS

CompactRIO, LabVIEW, Hot air tunnel

ŠIMURDA, Jan *Řízení horkovzdušného modelu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2013. 54 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Řízení horkovzdušného modelu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Blahovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	10
2	Model tunelu	11
2.1	Měřicí snímače	11
2.1.1	Termistor	11
2.1.2	Vrtulkový průtokoměr	12
2.2	CompactRIO	12
2.2.1	NI 9076 Šasí CompactRIA	12
2.2.2	NI 9206 - Karta pro měření napětí	13
2.2.3	NI 9401 - Digitální karta	13
2.2.4	NI 9505 - Karta pro generování PWM signálu	13
2.3	POLOLU High-Power Motor Driver 24v23 CS	14
2.3.1	Použití modulu	14
3	Identifikace a řízení modelu	15
3.1	Základní pojmy	15
3.2	Regulovaná soustava	16
3.3	Identifikace soustavy	16
3.3.1	Z přechodové charakteristiky	16
3.3.2	Metoda nejmenších čtverců	17
3.4	Regulátory	18
3.4.1	P-regulátor	18
3.4.2	I-regulátor	18
3.4.3	PI-regulátor	19
3.4.4	Releový regulátor	19
3.4.5	Návrh regulátoru pomocí frekvenčních charakteristik	19
4	Propojení tunelu a CompactRIA	21
5	Stavba programu	23
5.1	Nastavení a práce s kartami v FPGA	23
5.1.1	Generace PWM pomocí karty NI 9505	23
5.1.2	Generace PWM pomocí karty NI 9401 a Motor Driver 24v23 CS	24
5.1.3	Použití enkodéru u karty NI 9505	25
5.1.4	Měření napětí pomocí karty NI 9206	26
5.2	Aplikace Tunel	28
5.2.1	Propojení FPGA s programem v PC	28

5.2.2	Linearizace termistorů	29
5.2.3	Identifikace soustavy	30
5.2.4	Návrh regulátorů	34
5.2.5	Regulace teploty pomocí ventilátoru	38
5.2.6	Regulace teploty pomocí žárovky	40
6	Závěr	42
	Literatura	44
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	45
	Seznam příloh	46
A	ÚLOHA 1	47
A.1	Zadání	47
A.2	Teoretický rozbor	48
A.3	Vypracování	50
B	Obsah přiloženého CD	53
C	Propojení CompactRIA a modelu	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Schéma modelu horkovzdušného tunelu	11
2.2	Platforma CompactRIO se všemi použitými kartami	13
2.3	deska plošného spoje High-Power Motor Driver 24v23CS[5]	14
3.1	Blokové schéma uzavřeného regulačního obvodu [10]	15
3.2	Přechodová charakteristika systému prvního řádu [10]	16
4.1	Průběh teploty před filtrací a po filtraci	21
4.2	Schématické zapojení navržené desky	22
4.3	Propojení CompactRIA s navrhnutou deskou	22
5.1	Časová smyčka pro ošetření generace PWM pomocí karty 9505	23
5.2	Časová smyčka pro generaci PWM pomocí karty NI 9505	24
5.3	Zápis na výstupy karty 9505	24
5.4	Generace PWM pomocí karty 9401	25
5.5	Čtení pulzů ze vstupu Phase A	26
5.6	Vyhodnocení otáček	26
5.7	Snímání napětí pomocí karty NI 9206	27
5.8	Přední panel v FPGA	27
5.9	Home obrazovka	28
5.10	Otevření a práce s hodnotami z FPGA v main.vi	29
5.11	Čelní panel pro identifikaci soustavy	31
5.12	Průběh identifikace soustavy ventilátor - termistor (T1)	32
5.13	Průběh naměřených hodnot a vypočtené soustavy ventilátor - termis- tor(T1)	32
5.14	Průběh identifikace soustavy žárovka - termistor (T1)	33
5.15	Průběh naměřených hodnot a vypočtené soustavy žárovka - termistor (T1)	33
5.16	Čelní panel návrhového prostředí	34
5.17	Simulovaná odezva na jednotkový skok řízení pro soustavu ventilátor - termistor (T1)	36
5.18	Simulovaná odezva na jednotkový skok řízení pro soustavu žárovka termistor (T1)	37
5.19	Čelní panel pro řízení teploty pomocí ventilátoru	38
5.20	Naměřená přechodová charakteristika pro soustavu ventilátor - ter- mistor (T1)	39
5.21	Čelní panel řízení teploty pomocí žárovky	40
5.22	Průběh teploty pro soustavu žárovka - termistor (T1)	41
5.23	Regulaci teploty pomocí releového regulátoru	41
A.1	Přechodová charakteristika systému prvního řádu[10]	48

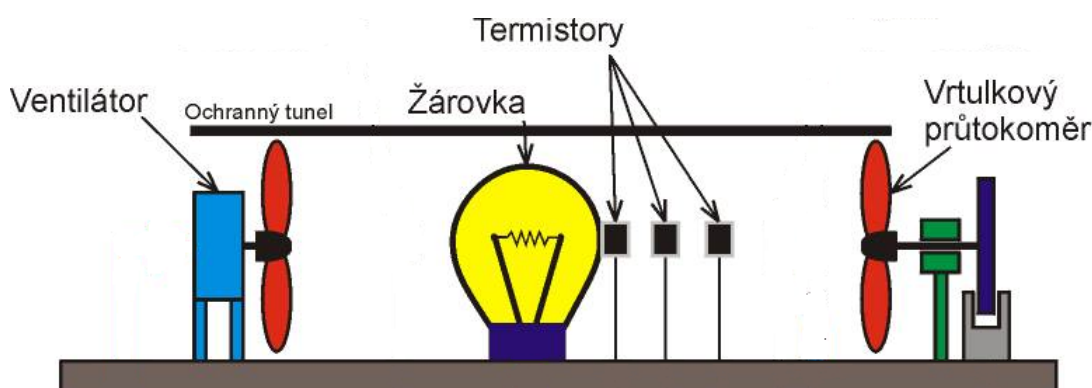
A.2	Průběh naměřených hodnot a vypočtené soustavy žárovka - termistor (T1)	50
A.3	Simulovaná odezva na jednotkový skok řízení pro soustavu žárovka termistor (T1)	51
A.4	Průběh skutečné teploty pro soustavu žárovka - termistor (T1)	52
A.5	Rele	52
C.1	Propojení oídícího systému CompactRIO s modelem tunelu	54

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá modernizací ovládání a uživatelského prostředí pro model teplovzdušného tunelu, který byl sestaven na Vysoké škole báňské v Ostravě. Původní tunel byl řízen přes mikrokontrolér a pomocí programu CTRL. Cílem je přizpůsobit tunel tak, aby mohl být ovládaný pomocí řídicího systému CompactRio od společnosti National Instruments. Napsat program pro komunikaci mezi tunelem a řídicím systémem a vše přizpůsobit tak, aby student co nejlépe pronikl do dané problematiky řízení a mohl vyzkoušet co nejvíce možností na reálném modelu, byly implementovány 2 techniky řízení. První je regulace teploty pomocí ventilátoru a druhá je regulace teploty pomocí žárovky. Student si také může procvičit techniku identifikace soustavy, návrh regulátoru ve vývojovém studiu a poté daný regulátor odzkoušet na modelu tunelu. Výstupem této práce bude úloha pro předmět řízení a regulace a ovládací program pro práci s tunelem.

2 MODEL TUNELU

Model je řízen pomocí řídicího systému CompactRIO od společnosti National Instruments. CompactRIO se skládá z rámu (NI 9146), do kterého jsou vloženy následující karty. Digitální karta (NI 9104), karta pro generování PWM signálu (NI 9505) a karta pro měření napětí (NI 9206). Dále je použit modul pro řízení stejnosměrných motorů od společnosti POLOLU s označením High-Power Motor Driver 24v23 CS. Tento modul slouží pro generaci druhého PWM signálu. Samotný model obsahuje 3 termistory typu NTC, ventilátor, žárovku a vrtulkový průtokoměr. Žárovka v tunelu slouží jako zdroj tepla a světla. Na žárovce je umístěn první ze tří termistorů (T1). Druhý termistor (T2) je ve vzdálenosti 5mm od žárovky a třetí termistor (T3) je umístěn v zadní části tunelu. Tyto termistory jsou rozmístěny tak, aby bylo možno měřit teplotu v různých částech tunelu.



Obr. 2.1: Schéma modelu horkovzdušného tunelu [9]

2.1 Měřicí snímače

2.1.1 Termistor

Jde o polovodičový prvek, který má výraznou závislost odporu na teplotě. Termistory dělíme podle závislosti na negativní (NTC) a pozitivní (PTC). V modelu tunelu jsou použity 3 termistory typu NTC jejichž odpor je $14\text{ K}\Omega$ při pokojové teplotě. Tyto termistory se již nevyrábějí, ale v modelu byly pro jejich stálou funkčnost zachovány.

2.1.2 Vrtulkový průtokoměr

Je tvořen ventilátorem bez napájení, ke kterému je připevněn nádstavec, ve kterém je vyvrtáno 8 otvorů. Tento nádstavec je vložen do výřezu, ve kterém je fotodioda a fototranzistor. Fototranzistor pracuje ve spínacím režimu. Jsou možný dva způsoby výpočtu, jak počítat otáčky kola. První způsob je takový, kdy počítáme dobu mezi trváním log. 1 a log. 0. Tento způsob se dá použít pouze v případě, že mezery mezi otvorem a plnou plochou by byly stejné. To u tohoto přípravku není zajištěno, takže jsme se rozhodli použít metodu 2. Ta vychází z toho, že počítáme náběžné a sestupné hrany za určitý časový úsek.

2.2 CompactRIO

2.2.1 NI 9076 Šasí CompactRIA

Jde o 4-slotový rám, který kombinuje integrovaný 40 MHz Real - Time procesor s hradlovým polem typu Spartan-6 LX45 od společnosti XILINX. Šasí obsahuje 256MB DRAM jako operační paměť a 512MB pro uložení programu a dat. Lze ho dále rozšířit o vstupně/výstupní C moduly. Zařízení komunikuje pomocí Ethernet 10/100, přes který získáváme přístup ke všem připojeným modulům nebo pomocí USB 2.0 portu a sériového portu RS232. Napájení je v rozmezí 9-30 V. Pro naše účely zařízení napájíme 24 V. Výhodou tohoto zařízení jsou malé rozměry a nízké pořizovací náklady [1].

FPGA

Programovatelné hradlové pole bylo vyvinuto firmou XILINX v roce 1984. FPGA se skládá z logických obvodů, které jsou propojeny globální propojovací maticí. Velkou výhodou je, že tyto obvody pracují paralelně a nemusí se přít o stejné zdroje. Z toho vyplývá vyšší výpočetní výkon a rychlejší odezva na hardwarové úrovni [7].

Real-Time

Operační systémy reálného času se vyznačují tím, že jsou schopny provádět výpočty a reagovat na události v definovaných časových intervalech (deadlines). Systém, který je v šasí NI 9076, pracuje v hard deadlines režimu. Pokud data přijdou po definované době, jsou pro systém bezcenná, neplatná, někdy i nebezpečná [8]. Těchto vlastností v našem programu nevyužíváme, protože v tomto režimu nefunguje vyhodnocení identifikace.

2.2.2 NI 9206 - Karta pro měření napětí

Karta je vybavena 16 analogovými vstupy, které mají 16-bit rozlišení a maximální vzorkovací rychlost 250kS/s. Každý kanál na kartě má programovatelné vstupní rozhraní s rozsahy $\pm 200\text{ mV}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$ a $\pm 10\text{ V}$. Modul používáme pro sledování napětí na termistorech[2].

2.2.3 NI 9401 - Digitální karta

Jde o digitální kartu s 8 I/O kanály, které mají vzorkovací periodu 100ns. Kartu lze nastavit tak, že jsou všechny kanály buď vstupní, výstupní nebo 4 vstupní a 4 výstupní. Každý kanál má 5V TTL úroveň. Tato karta se hodí pro vytváření vlastních čítačů, časovačů nebo jako pulzní generátor. Je používána jako generátor PWM signálu, který je přiváděn dále do modulu High-Power Motor Driver 24v23 CS a jeho dalších řídicích signálů [3].

2.2.4 NI 9505 - Karta pro generování PWM signálu

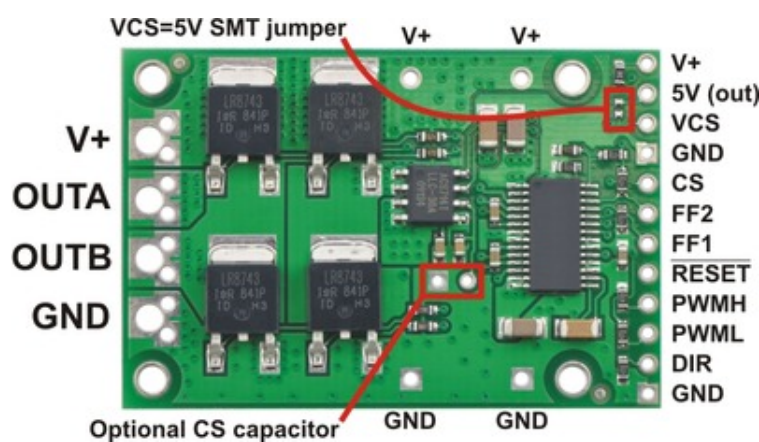
Tato karta obsahuje plný H-můstek pro přímé řízení pohonů. Přenáší trvalý proud 5A při teplotě 40 °C. Výstupní napětí karty je v rozsahu od 8 do 30 V podle toho, jaké napětí přivedeme na její vstupy. Napětí na enkodéru je 5 V. Karta je používána pro řízení napájení ventilátoru a snímání pulzů pomocí enkodéru [4].



Obr. 2.2: Platforma CompactRIO se všemi použitými kartami

2.3 POLOLU High-Power Motor Driver 24v23 CS

Tento modul je určen pro řízení elektrických stejnosměrných motorů. K řízení využívá H-můstek sestavený z tranzistorů MOSFET. Tranzistory MOSFET mají jmenovité maximální napětí 40 V. Za normálních provozních podmínek je bezpečné maximální napětí 34 V. Modul má širokou škálu proudů a napětí, můžeme dodávat trvalý proud až 23 A bez přídavného chladiče. Má také snímač proudu, který měří obousměrný proud motoru s velikostí do 30 A. Modul má integrovanou detekci zkratů, ale neobsahuje reverzní ochranu napájení, nadproudovou ochranu nebo ochranu proti přehřátí.



Obr. 2.3: deska plošného spoje High-Power Motor Driver 24v23CS[5]

2.3.1 Použití modulu

Kontakty k připojení motoru a napájení jsou na jedné straně desky, kdežto řídicí (logická 5V) část je na straně druhé. Na desce jsou instalovány dva kondenzátory, které slouží ke snížení elektrického šumu. Log. 1 je v rozmezí mezi 3,5 - 5,5 V. Na desce je nutno připojit kontakt PWMH a DIR. Deska má 2 kontakty pro sledování poruchy (FF1 a FF2), které poznáme z poruchové tabulky. Toto tabulku nalezneme na stránkách výrobce, nebo v datasheetu dodávanému k tomuto modulu. Pokud přivedeme LOW na kontakt RESET, obvod je v režimu spánku a vymaže všechny uzamykací a chybové příznaky. Kontakt V+ na logické straně desky slouží k monitorování napájení motoru. Modul má také 5V kontakt, který poskytuje proud několik miliampérů. Obvykle slouží k napájení mikrokontrolérů s nízkou spotřebou. Tento kontakt můžeme propojit s kontaktem VSC, takže kontakt 5V slouží k napájení kontaktu VSC (proudový snímač).

3 IDENTIFIKACE A ŘÍZENÍ MODELU

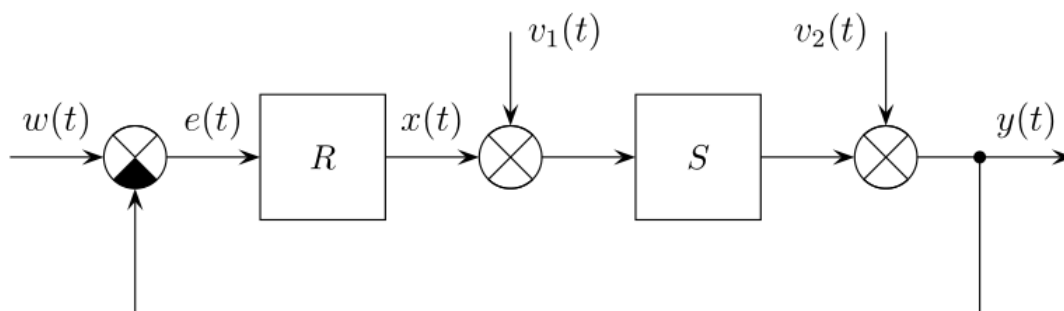
3.1 Základní pojmy

Řízení je cílené působení na řízený objekt tak, aby bylo dosaženo určitých předepsaných cílů[10]. Řízení se dělí na ruční a automatické. Automatické řízení se dále dělí na řízení přímé a nepřímé. U přímého řízení probíhá řídicí proces bez přívodu zvláštní energie. To znamená, že všechna potřebná energie pro řízení se dostává přímo z řízeného procesu. Příkladem je jednoduchá regulace hladiny. Nepřímé řízení má zvláštní přívod energie pro zařízení. U nepřímého řízení se využívá různých elektrických, pneumatických a hydraulických zesilovačů. Dále pak můžeme řízení dělit na ovládání a regulaci podle toho, zda je výsledek zpětně kontrolovaný.

Ovládání - můžeme ho také nazývat řízení v otevřené smyčce. Při tomto řízení nedochází ke zpětné kontrole výsledků. Jako příklad si můžeme představit, že do skladu pravidelně dodáváme zboží bez zpětné vazby o odběru.

Regulace - je řízení se zpětnou vazbou. V tomto řízení je velikost zvolené veličiny měřená a porovnávána s žádanou hodnotou. Řízení pak probíhá v závislosti na vypočítané odchylce. Jako příklad je vytápění místnosti, kde měříme aktuální teplotu (termostaty).

Regulační obvod - na obrázku 3.1 můžeme vidět nejjednodušší verzi uzavřeného regulačního obvodu. Kde $w(t)$ je řídicí veličina, ta vstupuje do součtového členu, kde je porovnávána s regulovanou veličinou $y(t)$. Výstupem z rozdílového členu je regulační odchylka $e(t)$, která vstupuje do regulátoru.



Obr. 3.1: Blokové schéma uzavřeného regulačního obvodu [10]

3.2 Regulovaná soustava

Jedná se o objekty řízení. Každá soustava má velmi rozmanité vlastnosti, například dynamiku, nebo setrvačnost[10]. V praxi se často setkáváme se soustavami, které jsou tvořeny spojením setrvačných článků. Z hlediska řízení nás u soustav nejčastěji zajímá hodnota největších časových konstant. Každá soustava se dá popsat například diferenciálními rovnicemi, nebo oprátorovým přenosem. Popis soustavy je potřebný pro návrh regulátorů. Ukážeme si 2 možnost, jak získat operátorový přenos soustavy.

3.3 Identifikace soustavy

Popíšeme si dvě metody identifikace. První je metoda určení konstant přenosu soustavy z přechodové charakteristiky. Díky této metodě dostaneme počáteční odhad, jak má soustava vypadat. U druhé metody dostaneme už kompletní přenos. V praktické části si ukážeme identifikaci pomocí vývojového prostředí Labview.

3.3.1 Z přechodové charakteristiky

Na obrázku 3.2 vidíme přechodovou charakteristiku systému prvního řádu s dopravním zpožděním, kde jednotlivé konstanty představují:

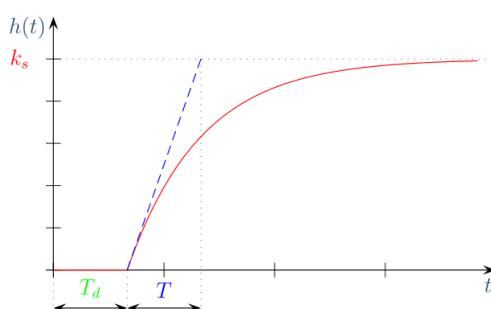
k_s je zesílení

T_d je dopravní zpoždění

T je doba náběhu

Potom se dá tedy přenos soustavy zapsat jako:

$$F(p) = \frac{k_s}{Tp + 1} e^{-T_d p}$$



Obr. 3.2: Přechodová charakteristika systému prvního řádu [10]

3.3.2 Metoda nejmenších čtverců

Jedná se o nejpoužívanější metodu u většiny identifikačních algoritmů. Tato metoda patří mezi metody regresní analýzy [12]. Pro vektor parametrů a vektor dat budeme předpokládat $\deg a = \deg b = n, \deg d = 0$, z toho vyplývá, že rozměr je $\deg z = 2n$.

Vektor parametrů:

$$\theta^T(k) = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n]$$

Vektor dat:

$$F^T(k-1) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n), -u(k-1), -u(k-2), \dots, -u(k-n)]$$

Potom výstupní veličinu $y(k)$, můžeme vyjádřit rovnicí:

$$y = F\theta + e$$

Kde matice F má rozměr $(N - n, 2n)$ a její tvar je:

$$F = \begin{bmatrix} -y(n) & -y(n-1) & \dots & -y(1) & u(n) & u(n-1) & \dots & u(1) \\ -y(n+1) & -y(n) & \dots & -y(2) & u(n+1) & u(n) & \dots & u(2) \\ & & \dots & & & & \dots & \\ -y(N-1) & -y(N-2) & \dots & -y(N-n) & u(N-1) & u(N-2) & \dots & u(N-n) \end{bmatrix}.$$

Vektory y, e mají rozměr $(N-n)$ a jejich tvar je:

$$y^T = [y(n+1)y(n+2)\dots y(N)]$$

$$e^T = [e_r(n+1)e_r(n+2)\dots e_r(N)]$$

kde N je počet měřících cyklů. Z předchozí rovnice lze určit chybu:

$$e = y - F\theta$$

zavedeme kritérium:

$$J = e^T e = (y - F\theta)^T (y - F\theta)$$

Když položíme první derivaci vektorů parametru θ rovno nule, získáme minimum. Řešením této rovnice dostaneme základní maticový tvar pro odhad parametrů metodou nejmenších čtverců, který má rovnici:

$$\theta = (F^T F)^{-1} F^T y$$

Tímto vztahem vypočítáme jednorázový odhad parametrů, pro N počtu měření.

3.4 Regulátory

Regulátor působí pomocí akční veličiny na soustavu tak, aby byla regulační odchylka co nejmenší[10]. U regulátoru nás nejčastěji zajímá návrh ústředního členu. Regulátor může obsahovat například výkonový zesilovač, měřící člen a převodník vstupní veličiny. Tyto členy mají většinou standardní vlastnosti dané konstrukcí. Z hlediska dynamiky se jedná o proporcionální členy a nejčastěji je zahrnujeme do přenosu soustavy. V praxi se používají regulátory složené z těchto tří složek: proporcionální (P), integrační (I), derivační (D). Z těchto složek můžeme poskládat různé typy regulátorů od nejjednodušších až po regulátor PID. U regulátoru PD a PID musíme dát pozor na to, aby byla zajištěna realizovatelnost, proto volíme realizační časovou konstantu, která je o 2 řády větší, než jsou časové konstanty v čitateli regulátoru.

3.4.1 P-regulátor

Jedná se o nejjednodušší regulátor, kde je akční veličina přímo úměrná velikosti regulační odchylky. Nevýhodou tohoto regulátoru je, že nezajišťuje nulovou ustálenou odchylku pro nenulovou konstantní žádanou hodnotu u statických soustav, stejně jako poruchu. Vztah mezi akční veličinou a regulační odchylkou je přímo úměrný, platí tedy:

$$x(t) = r_0 e(t)$$

Přenosová funkce:

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)} = r_0 = K_R$$

3.4.2 I-regulátor

Použitím I složky v regulátoru dostaneme nulovou regulační odchylku i poruchu. Nevýhodou je zhoršení dynamických vlastností regulátoru a zpomalení přechodového děje.

Vztah pro časový průběh:

$$x(t) = r_i \int_0^t e(t) dt + x(0)$$

Přenosová funkce:

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)} = \frac{r_i}{p} = \frac{1}{T_i(p)}$$

3.4.3 PI-regulátor

Jak můžeme vidět, v PI regulátoru jsou zastoupeny 2 složky, proporcionální a integrační. Integrační složka v regulátoru nám zajišťuje nulovou ustálenou odchylku.

Časový průběh:

$$x(t) = r_0 e(t) + r_i \int_0^t e(t) dt + x(0)$$

Přenosová funkce:

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)} = r_0 + \frac{r_i}{p} = k_r \frac{T_r p + 1}{p} = \frac{T_r p + 1}{T_i p}$$

Vztahy mezi konstantami pro různé formy přenosu

$$k_r = r_i = \frac{1}{T_i} \quad T_r \frac{r_0}{r_i} \quad r_0 = \frac{T_r}{T_i}$$

3.4.4 Releový regulátor

Jedná se o typ regulátoru, jehož akční veličina nabývá buďto maxima nebo minima. Velice často se tento typ regulátoru používá při řízení teploty. Pokud je požadovaná teplota menší, než aktuální teplota, relé je v sepnutém stavu a naopak. Pokud bychom takto řídili reálný systém, pak vlivem náhodných šumů z okolí při stavu, kdy požadovaná hodnota se rovná hodnotě výstupní, by relé začalo rychle kmitat. Proto je lepší použít relé s hysterezí[11].

3.4.5 Návrh regulátoru pomocí frekvenčních charakteristik

Při návrhu regulátorů pomocí frekvenčních charakteristik vycházíme z předpokladu, že změnou tvaru otevřené smyčky nepřímo měníme i tvar uzavřené smyčky[10]. Regulátor obvykle navrhujeme na určitou fázovou bezpečnost. Zjednodušeně se dá tato metoda návrhu popsat tak, že k frekvenční charakteristice soustavy "přičítáme" frekvenční charakteristiku vhodně navrženého regulátoru.

Nevýhodou tohoto návrhu je, že nepoznáme stabilitu obvodu, proto jej nelze použít pro stabilizaci soustav. Metoda se tedy používá výhradně pro stabilní soustavy. Obecně neplatí žádný přesný postup, jak pomocí této metody navrhnout vhodný regulátor. Můžeme se ovšem držet několika málo pravidel.

Z hlediska regulačního děje je pro nás nejzajímavější střední pásmo kmitočtů, tedy oblast ve které je $F_0 = 1$. V této oblasti chceme dosáhnout toho, aby hodnota ω_r a fázová bezpečnost byly co největší. ω_r nám určuje rychlost přechodového děje a fázová bezpečnost zajišťuje překmit přechodové charakteristiky.

Zásoba stability ve fázi

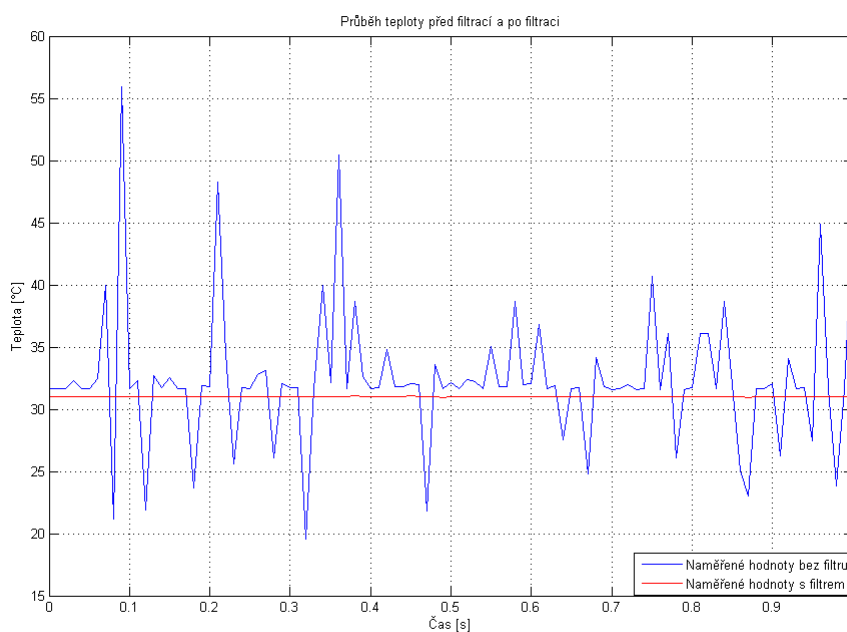
Můžeme ji také nazvat fázovou bezpečnost. Jedná se o záporně vzatou změnu fáze otevřeného obvodu, při které se dostane obvod na mez stability.

Zásoba stability v amplitudě

Také se jí říká amplitudová bezpečnost. Když hodnotou tohoto zesílení vynásobíme zesílení otevřené smyčky, tak přivedeme uzavřenou smyčku na mez stability.

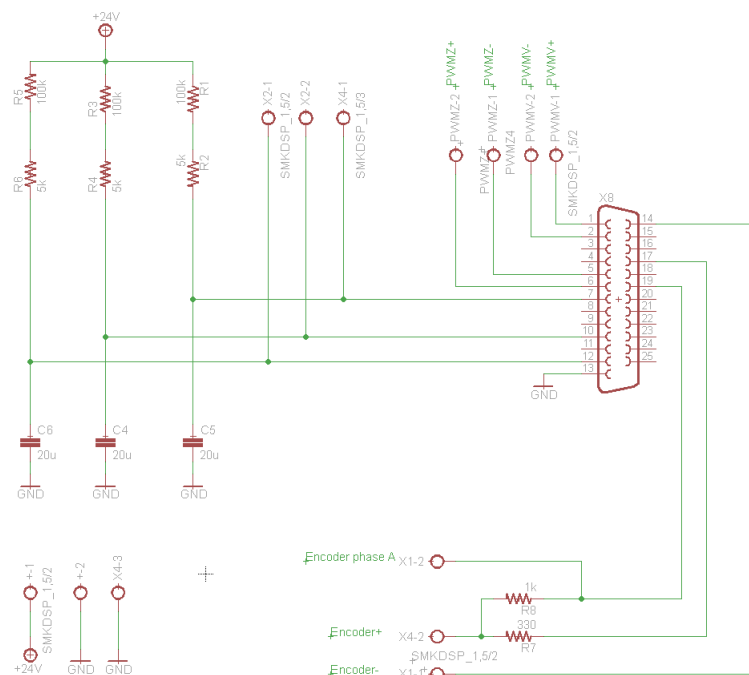
4 PROPOJENÍ TUNELU A COMPACTRIA

Napětí na termistorech měříme pomocí zapojení s napěťovým děličem. Tento dělič byl odvozen z původního zapojení, které obsahovalo operační zesilovače. Z tohoto zapojení jsme si určili proud procházející termistorem, který měl hodnotu 20mA, a na tento proud navrhli napěťový dělič. Výstupní napětí poté bylo v rozmezí od 0,5 - 4 V. Zapojení s operačními zesilovači nebylo použito, protože karta má pohyblivý rozsah, jak již bylo uvedeno v kapitole 2.2.2, a proto nepotřebujeme zesilovat signál z termistorů. Zapojení s napěťovým děličem je tedy dostačující pro potřeby řízení. V přenosu signálu z termistoru byl detekován šum, který pochází z PWM signálu. Pro minimalizaci tohoto šumu jsme navrhli nízkofrekvenční filtr s časovou konstantou 0,1s. Zvolený filtr dostatečně vyfiltroval signál z termistorů, jak je vidět v grafu 4.1. Časová konstanta filtru se dala zanedbat v přenosu soustav, jejichž časové konstanty jsou v řádech sekund. Před filtrací nabírala teplota náhodných hodnot kolem aktuální teploty v rozsahu až $\pm 20^\circ\text{C}$ po filtraci se tyto hodnoty snížily na $\pm 0,3^\circ\text{C}$.



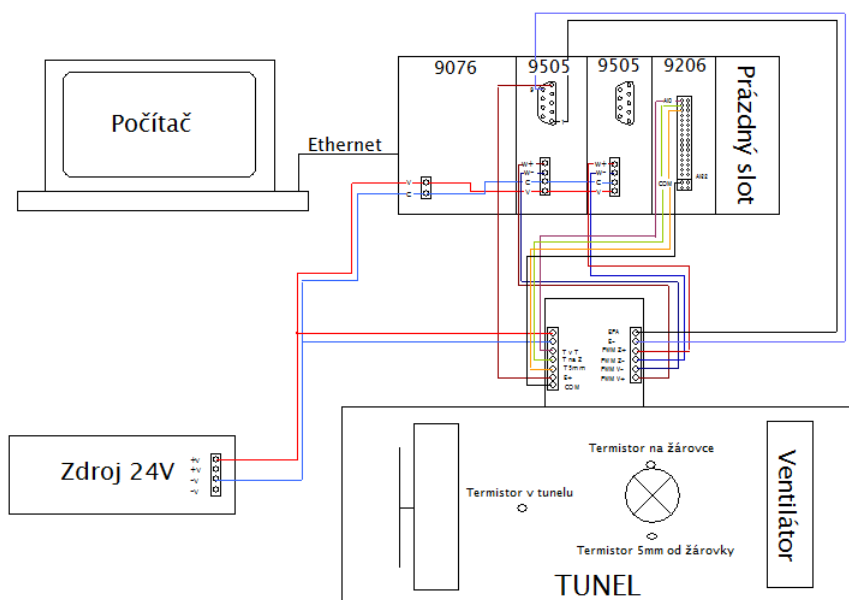
Obr. 4.1: Průběh teploty před filtrací a po filtraci

Zapojení jsme měli celou dobu realizované pro zkušební účely na nepájivém poli. Pomocí programu Eagle jsme zapojení převedli do schématu a následně vytvořili desku pološných spojů. Schéma zapojení součástek můžeme vidět na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Schématické zapojení navržené desky

Na obrázku 4.3 můžeme vidět propojení navržené desky s řídicím systémem CompactRIO, zdrojem napájení a počítačem. Navržená deska je k tunelu připojena pomocí 25 pinového konektoru.



Obr. 4.3: Propojení CompactRIA s navrhnoutou deskou

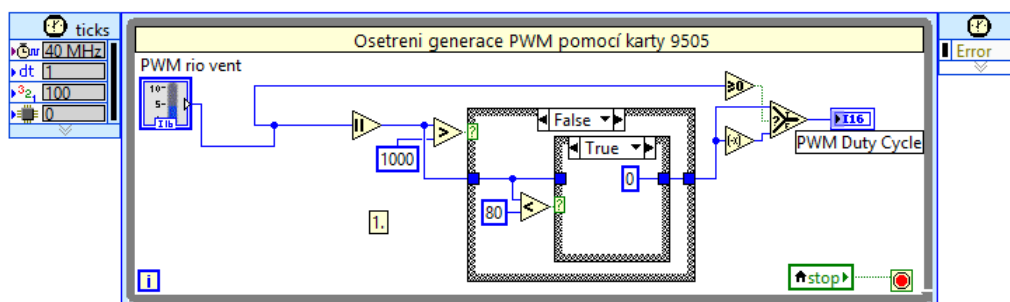
5 STAVBA PROGRAMU

Firma National Instruments dodává ke každému zařízení a toolkitu hotové ukázkové příklady, ze kterých jsme při tvorbě našeho programu vycházeli. Program je rozdělen na dvě části. Část, která se stará o chod aplikace, a část, která komunikuje s připojeným HW. V následující části si popíšeme komunikaci s kartami, jejich nastavení a předávání hodnot do hlavního VI.

5.1 Nastavení a práce s kartami v FPGA

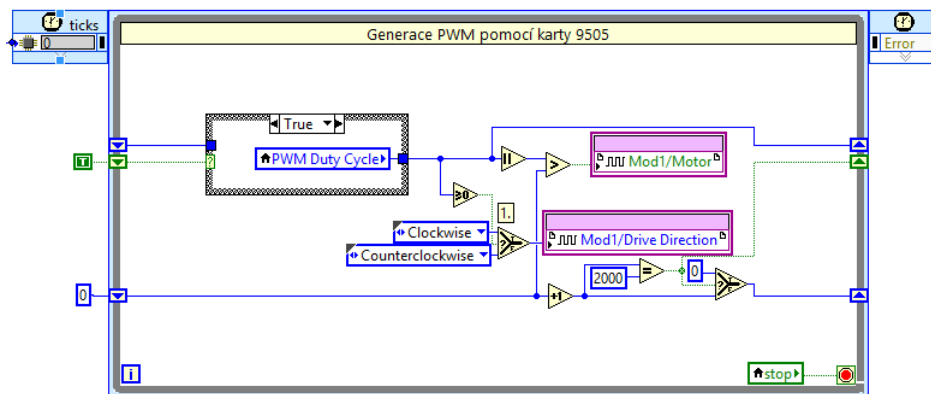
5.1.1 Generace PWM pomocí karty NI 9505

Napájení ventilátoru je v rozmezí od 0 do 12V. Zdroj, který používáme, má výstupní napětí 24 V. V programu jsme vytvořili PWM signál, který je zarovnaný směrem doprava. Hodnoty pro generaci PWM si zvolíme v rozmezí od 0 do 2000, přičemž při 2000 je výstupní napětí 24 V, což je mimo napájecí napětí ventilátoru, a tak byla horní hranice posunuta na 1000. Tímto je výstupní napětí omezeno na 12 V a nemusíme používat napěťové děliče ani jiné měniče napětí. V práci budeme předpokládat, že pro napětí 12 V je střída rovno 1. Dále je zde ošetření proti zadání nežádoucích hodnot, které by mohly ventilátor poškodit. Pokud zadáme číslo mimo pracovní oblast, program si ho sám přepíše na nejbližší možnou krajní hodnotu.



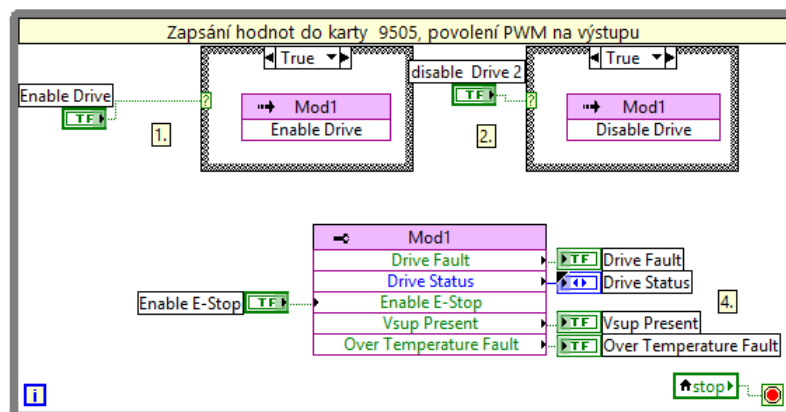
Obr. 5.1: Časová smyčka pro ošetření generace PWM pomocí karty 9505

Pro generaci PWM signálu jsme využili další smyčku. Rozdělením kódu do vícero smyček si zajistíme jejich paralelní běh v FPGA. Jak vidíme na obr. 5.2, ve smyčce máme čítač směrem nahoru, který čítá do 2000. Hodnota, která je v proměnné *PWM Duty Cycle*, se porovnává s aktuální hodnotou v čítači. Když je hodnota v *PWM Duty Cycle* větší než hodnota v čítači, do proměnné *Motor* se zapíše log. 1. Při vynulování čítače se do proměnné *Motor* zapíše log. 0.



Obr. 5.2: Časová smyčka pro generaci PWM pomocí karty NI 9505

Výstupní PWM signál se zapíná pomocí proměnné *Enable Drive* a zastavuje pomocí proměnné *disable Drive 2* nebo *Enable E-Stop*.



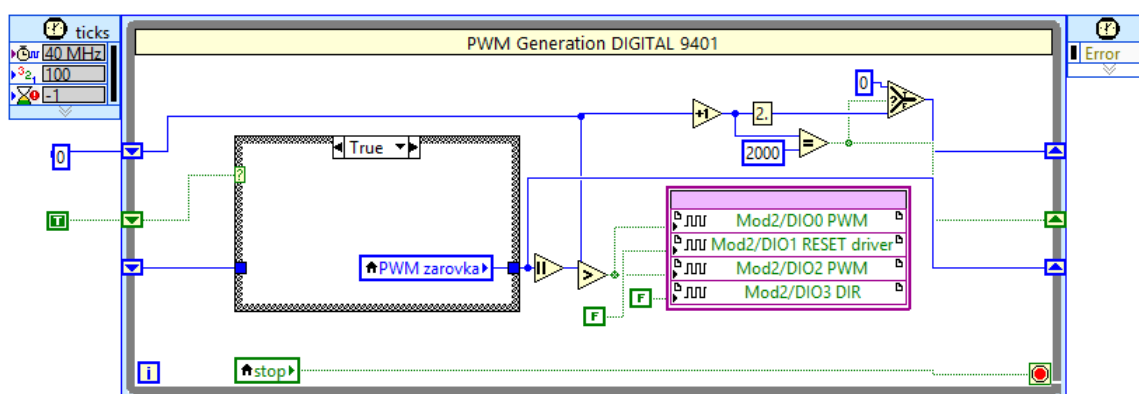
Obr. 5.3: Zápis na výstupy karty 9505

5.1.2 Generace PWM pomocí karty NI 9401 a Motor Driver 24v23 CS

Na začátku práce s kartou si nejdříve musíme definovat, které kontakty budou na kartě vstupní a které výstupní. V našem případě jsou první 4 dolní kontakty nastaveny jako výstupní a horní 4 kontakty jsou nastaveny jako vstupní. Toto nastavení najdeme v *propertis* karty. Na modul Motor Driver 24v23 CS přivádíme 4

signály. Dva odpovídají frekvenci PWM, kterou generujeme. Tyto signály přivádíme na kontakty modulu, které jsou pojmenované PWMH a PWML. Signál generujeme podobně jako v prvním příkladu, jak můžeme vidět na obr. 5.4. Opět je potřeba ošetřit krajní hodnoty, které může uživatel zadat. Tato hodnota je uložena v proměnné *PWM Duty Cycle 2*, která určuje poměr trvání log. 1. Ve smyčce běží čítač, který čítá do 2000. Hodnota, která je v proměnné *PWM Duty Cycle 2*, se porovnává s aktuální hodnotou v čítači. Když je hodnota v *PWM Duty Cycle 2* větší než hodnota v čítači, na výstup PWMH a PWML se zapíše log. 1.

Další signál, který potřebujeme, je *RESET driver*. Tento signál je nastaven trvale do log. 1. Řízení, čili ovládání směru otáčení, se nachází v proměnné *DIR*, kterou necháváme trvale v log. 0.

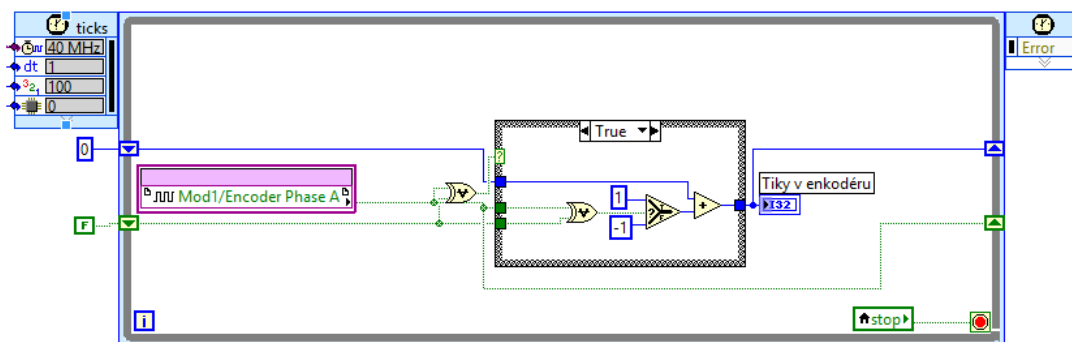


Obr. 5.4: Generace PWM pomocí karty 9401

Pomocí tohoto modulu ovládáme napětí, které přivádíme do žárovky. Toto napětí je v rozmezí od 0 do 12V. Na konci práce, z důvodů úspory kabeláže a bodů, kde se dají dráty odpojit, byla tato karta nahrazena druhou kartou pro generaci PWM signálu (NI 9505). V programové části jsme použili stejnou část kódu jako v kapitole 5.1.1. V tomto kódu jsme změnili číslo módu a vstupní proměnnou, podle které se určuje střída signálu.

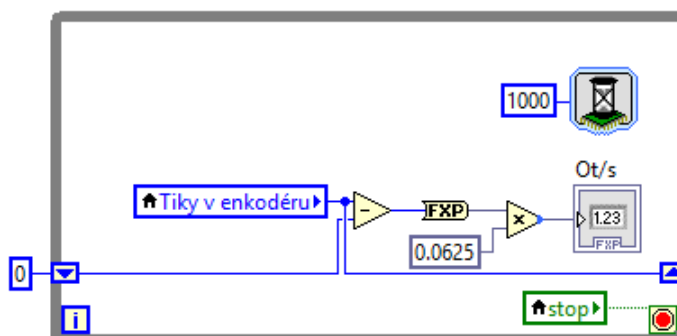
5.1.3 Použití enkodéru u karty NI 9505

K vyhodnocování pulzů z *Phase A* jsme použili schéma, které je vidět na obr. 5.5. V časové smyčce, která má frekvenci 40 MHz ověřujeme zda nenastala změna hodnoty v *Phase A*.



Obr. 5.5: Čtení pulzů ze vstupu Phase A

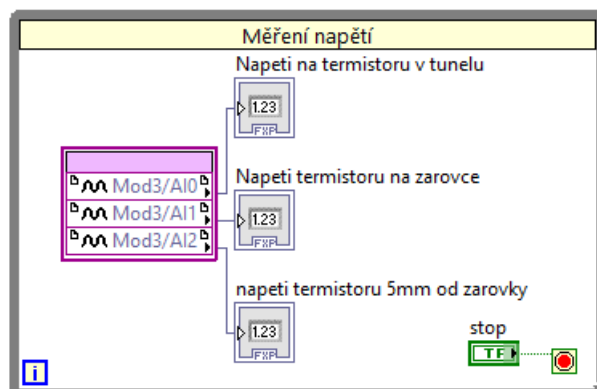
Pokud změna nastala, je do proměnné *Tiky v enkodéru* přičtena hodnota jedna. Tímto principem detekujeme každou hranu. V další smyčce, kterou můžeme vidět na obr. 5.6, vyhodnocujeme rozdíl hodnot v proměnné *Tiky v enkodéru* před sekundou a aktuální počet tiků v této proměnné. Výsledek poté násobíme číslem 0.0625, což odpovídá převrácenému počtu hran na nádstavci za jednu otáčku. Tímto způsobem získáme počet otáček za sekundu.



Obr. 5.6: Vyhodnocení otáček

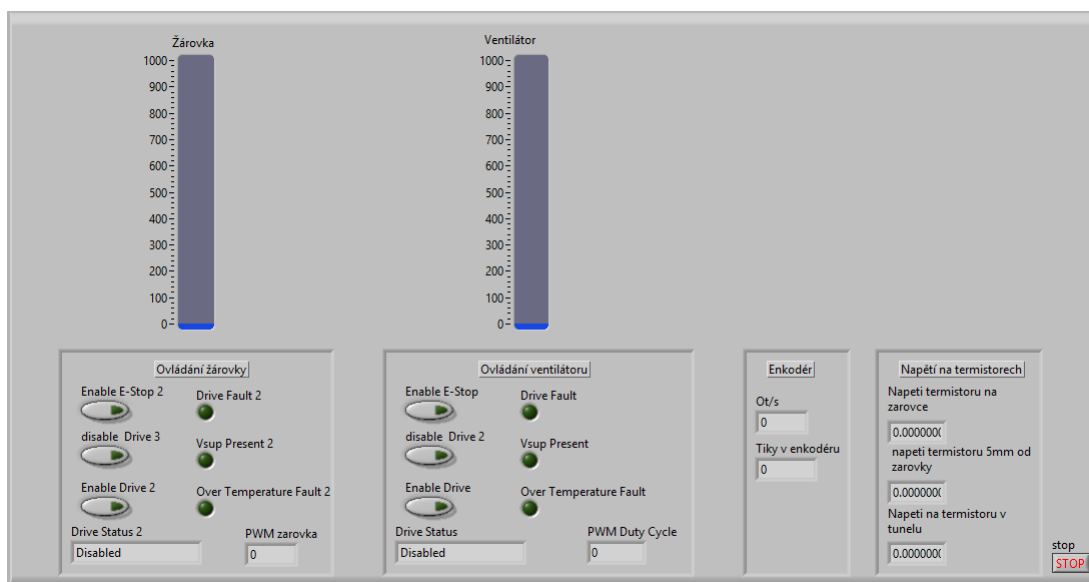
5.1.4 Měření napětí pomocí karty NI 9206

Pomocí této karty měříme napětí na termistorech. Měření na této kartě se nemůže provádět v časové smyčce jako ostatní operace, proto je použita smyčka *while*, jak je vidět na obr. 5.7. Z portu 0 - 2 snímáme hodnoty napětí na termistoru, které jsou pak vyvedeny do indikátorů a zobrazeny na čelním panelu.



Obr. 5.7: Snímání napětí pomocí karty NI 9206

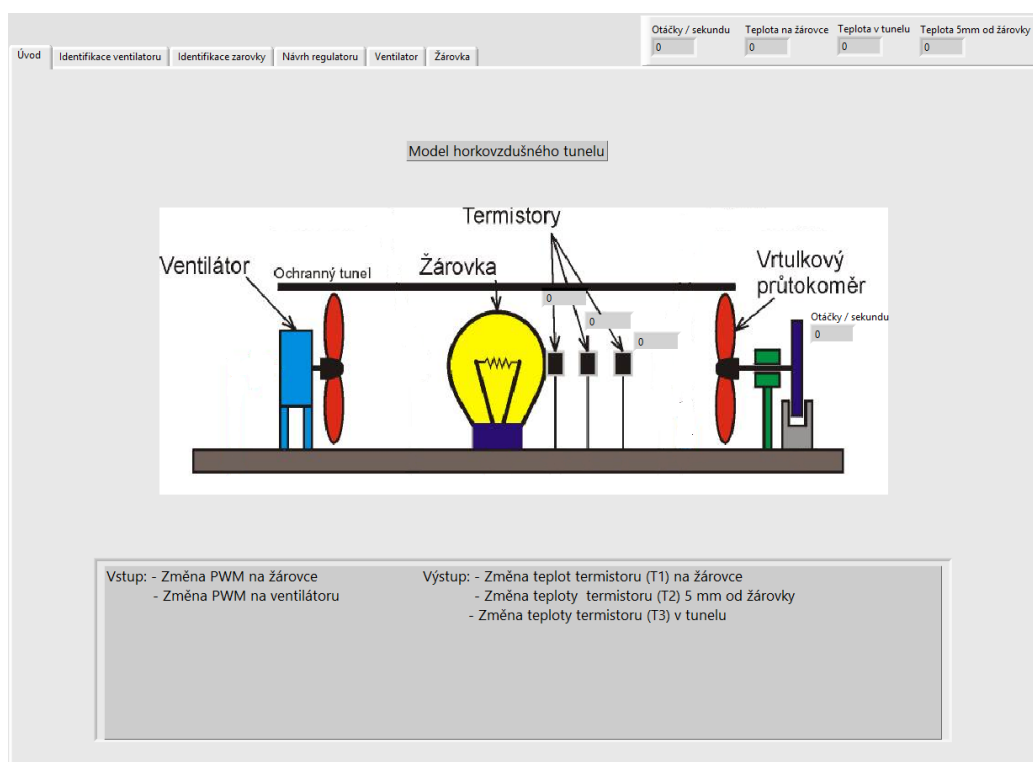
Ve výsledku vypadá čelní panel jako na obr. 5.8. Jedná se o samostatné VI, které můžeme spustit a vyzkoušet si, jestli fungují všechny snímače a generace PWM. Na ovládacím panelu můžeme nastavovat PWM žárovky, PWM ventilátoru a ve spodní části můžeme sledovat indikátory spojené s nastavením karet. Dále zde vidíme napětí na termistorech a pulzy z enkodéru. Toto je kompletní základní rozhraní pro komunikaci s tunelem. To ovšem uživatel programu Tunel.exe neuvidí, protože tohle VI je voláno speciálním blokem z *main.VI*.



Obr. 5.8: Přední panel v FPGA

5.2 Aplikace Tunel

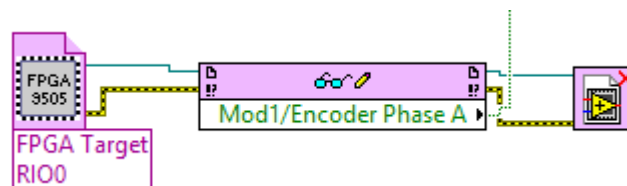
V předchozí kapitole jsme si ukázali, jak komunikovat s čidly a generovat PWM signál. K tomu, abychom s aplikací mohli dále pracovat, použijeme zvláštní *main.vi*, které se spouští na PC a ne v CompactRIO. Celá aplikace se skládá ze šesti záložek, které uživatelé provedou od popisu modelu, přes identifikaci soustavy, simulaci soustavy, návrh regulátoru, až po vyzkoušení navrženého regulátoru na fyzickém modelu. V pravém horním rohu jsou zobrazeny nejpotřebnější údaje, jako teploty v různých bodech tunelu a rychlost otáčení ventilátoru.



Obr. 5.9: Home obrazovka

5.2.1 Propojení FPGA s programem v PC

K tomu, abychom z *main.vi* mohli přistoupit k datům, které získáváme v FPGA režimu, potřebujeme nejdřív FPGA otevřít. FPGA otevřeme pomocí bloku *Open FPGA VI Referenc.* Poté již můžeme zpracovávat data z FPGA pomocí bloku *read/write control*, v němž si zvolíme, které proměnné chceme z FPGA číst a do kterých chceme zapisovat. Po ukončení práce s FPGA je potřeba jej uzavřít. K tomu slouží blok *Close FPGA VI Referenc.* Vše se odehrává v časových smyčkách, které pracují na frekvenci 100 Hz.



Obr. 5.10: Otevření a práce s hodnotami z FPGA v main.vi

5.2.2 Linearizace termistorů

Pro správné řízení bylo potřeba nakalibrovat a linearizovat termistory. Kalibrace byla provedena tak, že jsme postupně zvyšovali napětí na žárovce, počkali, až se ustálila hodnota napětí na termistoru, a zapisovali si velikost teploty z externího teploměru, jehož měřicí čidlo bylo umístěno také na žárovce. Tento způsob kalibrace je dostačující pro úlohu řízení. Pokud bychom chtěli přesnější kalibraci termistoru, museli bychom jej kalibrovat například ve vodě tak, že termistor bude ponořený s referenčním teploměrem. Vodu budeme postupně zahřívat a opět stejným způsobem bychom odečítali hodnoty. Poté jsme vše zapsali do tabulky a pomocí programu Excel vykreslili graf a zvolili nejvhodnější spojnicí trendu. U tohoto průběhu jsme spočítali aproximaci exponenciální funkcí, která nám vyšla

$$\vartheta = 43.315x^{-0.501} \quad (5.1)$$

ϑ je výstupní teplota[°C]

x je napětí na termistoru [V]

Linearizace termistoru nemohla být zapsaná v *FPGA* režimu, protože nepracuje s datovým typem *double*. Proto se nachází v *main.VI*.

5.2.3 Identifikace soustavy

Popis soustav

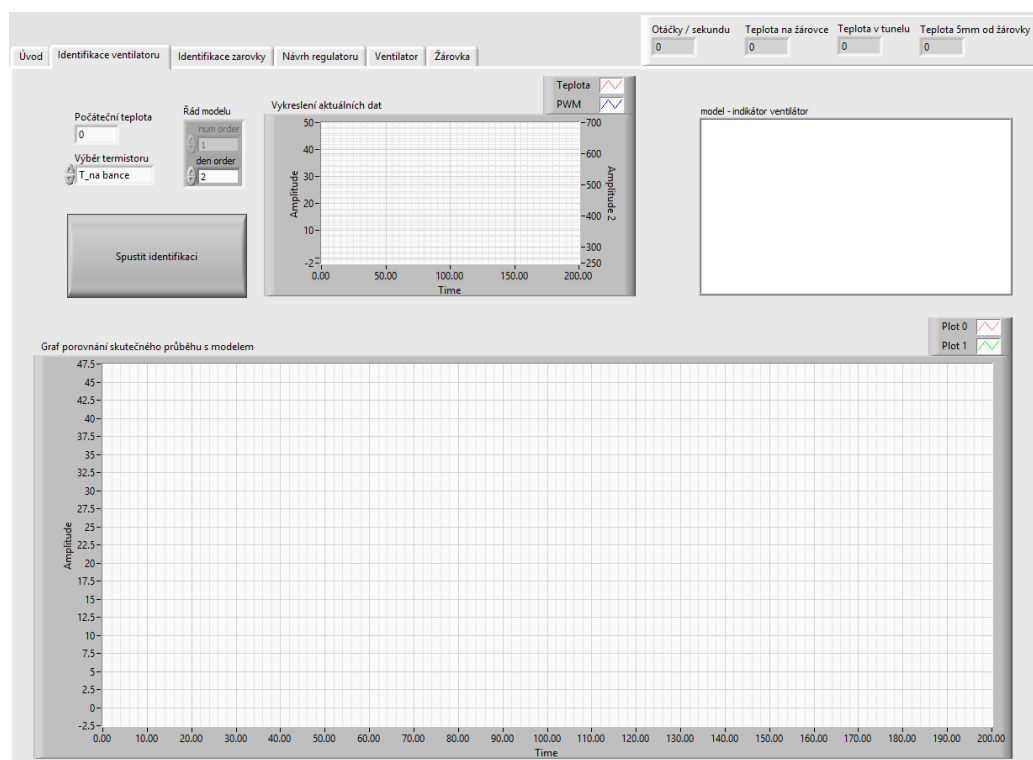
První soustava je žárovka - termistor (T1). Vstupem pro tuto soustavu je změna PWM signálu (napětí) přiváděného do žárovky a výstupem je změna teploty na termistoru. Tato soustava byla částečně linearizovaná pomocí ventilátoru, jehož PWM signál byl nastaven na 350, což odpovídá 4,2 V. Tímto si zajistíme, že dostaneme přibližně stejnou přechodovou charakteristiku jak při záporné změně řízení, tak při kladné změně řízení.

Druhá soustava je ventilátor - termistor (T1). Vstupem je opět změna PWM signálu přiváděného do ventilátoru a výstupem je změna teploty na termistoru. V této soustavě je trvale sepnutá žárovka na maximální výkon. Tím jsme docílili, že tato soustava bude mít přibližně stejné chování jak při snižování teploty, tak při zvyšování teploty. Díky tomuto omezení nám vyšla velice úzká pracovní oblast, která se pohybuje od 34 °C do 39 °C. Tato pracovní oblast může být proměnlivá, záleží na počátečních podmínkách. Tyto podmínky jsou pokojová teplota a teplota plechového krytu tunelu, který se postupem měření ohřívá.

Popis prostředí identifikace

Prostředí pro identifikaci obou soustav má stejné ovládací prvky, jak je vidět na obr. 5.11. Před spuštěním identifikace je nutné zadat počáteční teplotu termistoru do pole *Počáteční teplota*. Tímto si zajistíme, že přechodová charakteristika bude začínat od nuly. Dále si můžeme vybrat, na kterém ze tří termistorů budeme teplotu měřit. Tento výběr se provádí v poli *Výběr termistoru*. Jako základní termistor je nastaven termistor na baňce žárovky (T1). Poslední nastavení je počáteční odhad řádu soustavy. V prvku *Řád soustavy* si navolíme řád čitatele a řád jmenovatele. Po tomto počátečním nastavení je možné pomocí tlačítka *Spustit identifikaci* zapnout identifikaci soustavy.

Jakmile zapneme identifikaci, v grafu *Vykreslení aktuálních dat* se nám začne zobrazovat průběh PWM signálu na daném vstupním prvku a výstupní teplota na vybraném termistoru posunuta do 0. Proces identifikace trvá 200 s. Po uplynutí této doby se nám v poli *model - indikátor* zobrazí přenos soustavy a v grafu *Graf porovnání skutečného průběhu s modelem* se zobrazí naměřený přenos a přenos vypočteného modelu, který reaguje na stejný vstupní signál.



Obr. 5.11: Čelní panel pro identifikaci soustavy

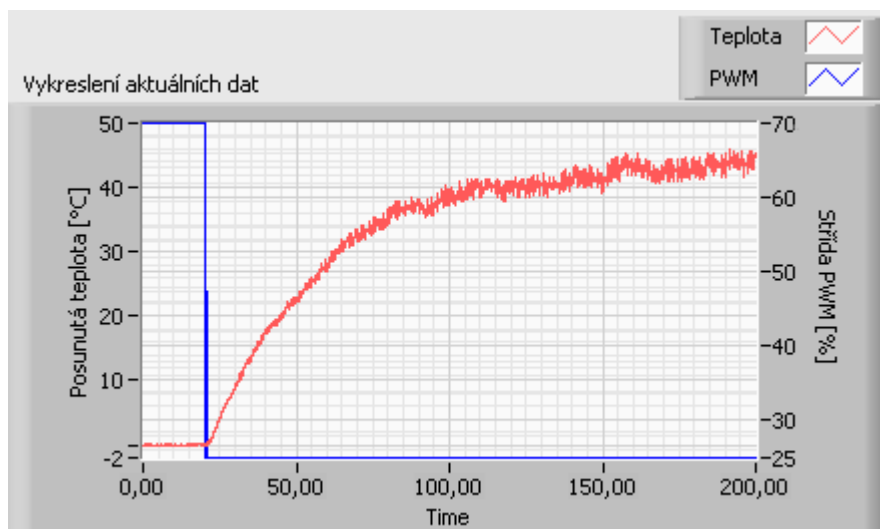
Postup identifikace ventilátor - termistor

Po kliknutí na záložku *Identifikace ventilátor* je na žárovku přiveden PWM signál se střídou 1, což odpovídá napětí(12 V), a na ventilátor je přiveden PWM signál se střídou 0.7, což odpovídá 8.4 V. Počkáme, až se teplota na baňce žárovky ustálí. Po zadání počátečních podmínek spustíme identifikaci, v čase $t = 20\text{ s}$ se provede skoková změna střídy PWM signálu na ventilátoru z 0.7 (8.4 V) na 0.25(3 V). Poté soustava na tento skok začne reagovat tak, že teplota začne stoupat. V grafu na obr.5.12 vidíme průběh teploty při identifikaci a vstupní střídu PWM signálu v procentech.

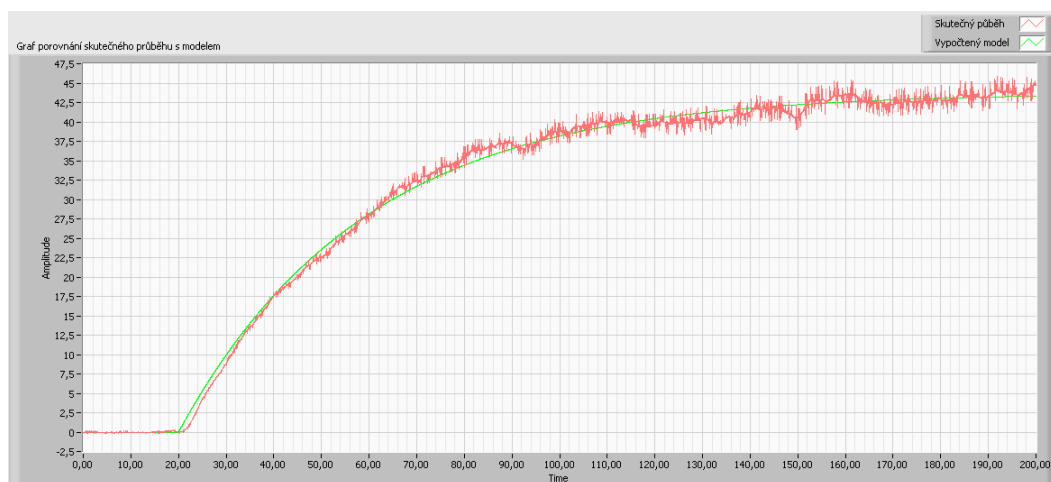
Po dokončení identifikace se v indikátoru *Rovnice soustavy* objeví rovnice přenosu soustavy. Přenos se vypíše ve tvaru, kde vidíme polynom čitatele a polynom jmenovatele.

Jak je vidět z přechodové charakteristiky, jedná se o soustavu druhého řádu. Její časové konstanty jsou $T_1 = 41.66$, $T_2 = 2.88$ a zesílení $K_s = 0.102$. Přenos soustavy potom můžeme zapsat jako

$$F_{s1}(p) = \frac{0.102}{(41.66p + 1)(2.88p + 1)} \quad (5.2)$$



Obr. 5.12: Průběh identifikace soustavy ventilátor - termistor (T1)

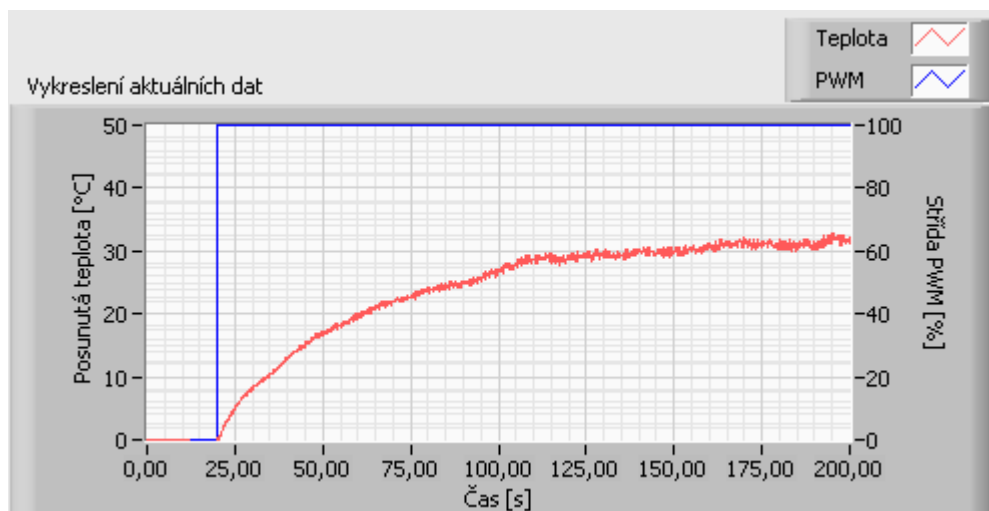


Obr. 5.13: Průběh naměřených hodnot a vypočtené soustavy ventilátor - termistor (T1)

Postup identifikace žárovka - termistor

Stejným postupem identifikujeme také soustavu žárovka-termistor, akorát se změní počáteční parametry. Po kliknutí na záložku *Identifikace žárovka* je ventilátor nastaven se střídou PWM signálu 0,35, což odpovídá napětí 4.2V. Jakmile se ustálí teplota v tunelu, zadáme tuto teplotu do prvku *počáteční teplota* a spustíme identifikaci. V čase $t = 20s$ se provede skoková změna střídý PWM signálu žárovky z 0 na 1, což odpovídá napětí z 0 na 12V, a počkáme, až se nám vykreslí přechodová charakteristika, která je vidět na obr. 5.14.

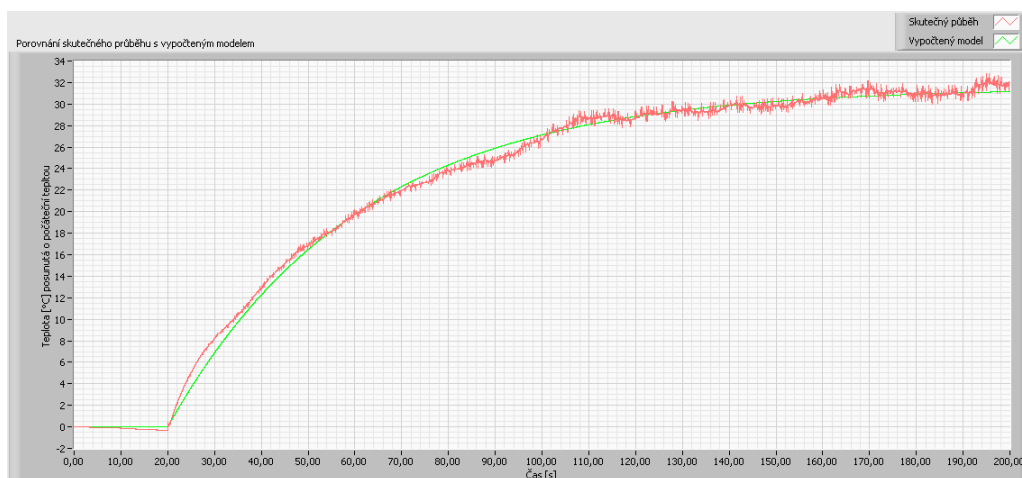
Jak je vidět z obr 5.15, jedná se o soustavu prvního řádu, jejíž časová konstanta



Obr. 5.14: Průběh identifikace soustavy žárovka - termistor (T1)

má velikost $T = 35.5$ a zesílení $K = 0.54$. Přenosová funkce soustavy má tedy tvar:

$$F_{s2}(p) = \frac{0.54}{35.5p + 1} \quad (5.3)$$



Obr. 5.15: Průběh naměřených hodnot a vypočtené soustavy žárovka - termistor (T1)

Identifikace pomocí programu Matlab

Z programu Labview jsme pomocí funkce *export to Excel* exportovali hodnoty vstupního a výstupního signálu do programu Excel. Hodnoty se ukládají jako text oddělený středníky. Tyto hodnoty jsme si načtli v programu Matlab a pomocí Identifikačního toolboxu a identifikací spojitého modelu jsme ověřili výsledky z programu Labview.

Přenos soustavy ventilátor - termistor (T1) vyšel pomocí programu Matlab jako

$$F_{s1}(p) = \frac{0.102}{(41.62p + 1)(2.8p + 1)} \quad (5.4)$$

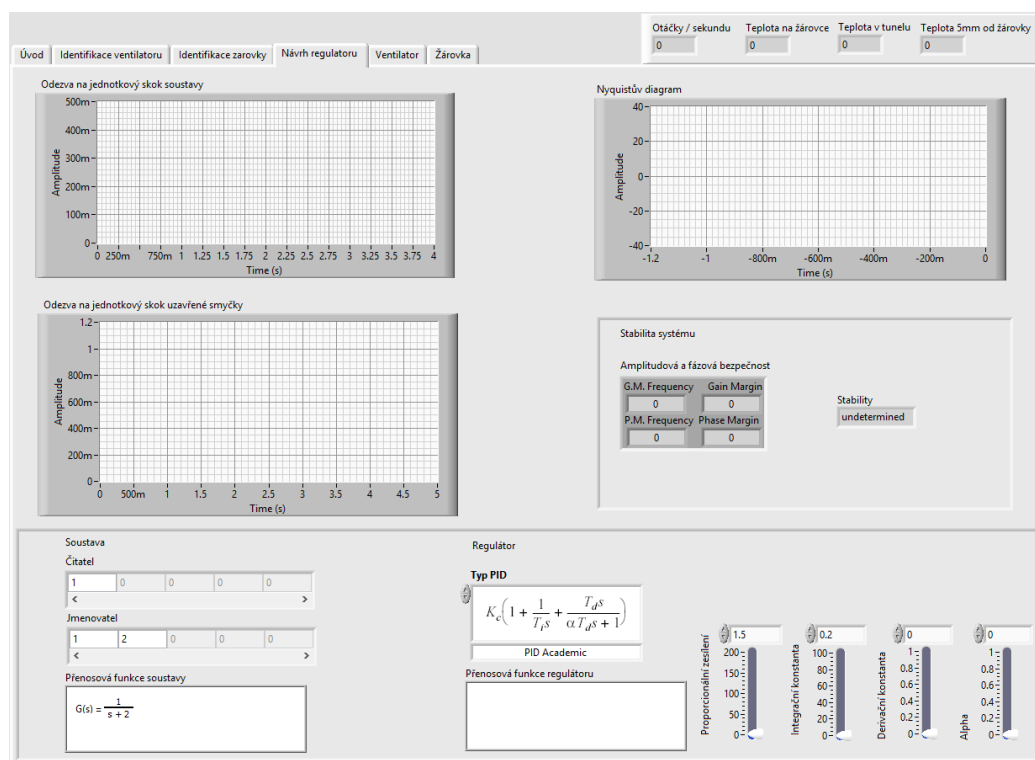
a přenos pro soustavu žárovku - termistor (T1)

$$F_{s2}(p) = \frac{0.54}{35.7p + 1} \quad (5.5)$$

Jak je vidět, výsledky z obou programů se liší pouze minimálně, což může být způsobeno chybou zaokrouhlování obou programů.

5.2.4 Návrh regulátorů

Tato část programu slouží pro simulaci soustavy a návrh regulátoru. K vytvoření této simulační části jsme použili toolboxu LabView Control Design and Simulation. Všechny změny, které v této části provedeme, se vykreslují ihned poté, co zadáme hodnotu. Čelní panel návrhového studia můžeme vidět na obr. 5.16.



Obr. 5.16: Čelní panel návrhového prostředí

Na začátku si zadáme přenos soustavy, jehož rovnice musí být ve tvaru polynomu. Tento tvar již dostaneme z identifikace systému, a proto není třeba jej přepočítat. Po

zadání přenosu soustavy se nám v levém horním grafu *Odezva na jednotkový skok soustavy* vykreslí přechodová charakteristika. Pod tímto grafem je umístěn druhý graf *Odezva na jednotkový skok řízení uzavřené smyčky*. V tomto grafu můžeme vidět přenos uzavřené smyčky soustavy s regulátorem. Dále je zde zobrazena fázová a amplitudová bezpečnost. Pro návrh regulátoru si můžeme vybrat ze tří zápisů regulátoru, které program Labview využívá.

První typ zápisu PID regulátoru je jediný, který se dá použít pro reálné řízení. Výhodou tohoto regulátoru oproti ostatním typům zápisu je to, že při změně zesílení se neovlivní časové konstanty integrační a derivační složky. Proto jsme jej použili také v naší práci. Jeho přenosová funkce je zapsaná ve tvaru

$$F_r(p) = Kc(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{\alpha T_d p + 1}) \quad (5.6)$$

Druhý typ regulátoru je paralelní PID jeho přenosová funkce se dá zapsat jako

$$F_r(p) = Kp + \frac{Ki}{p} + \frac{T_d p}{\alpha p + 1} \quad (5.7)$$

Poslední způsob zápisu regulátoru se jmenuje seriový PID a jeho přenosová funkce je

$$F_r(p) = Kc(1 + \frac{1}{T_i p})(\frac{T_d p + 1}{\alpha p + 1}) \quad (5.8)$$

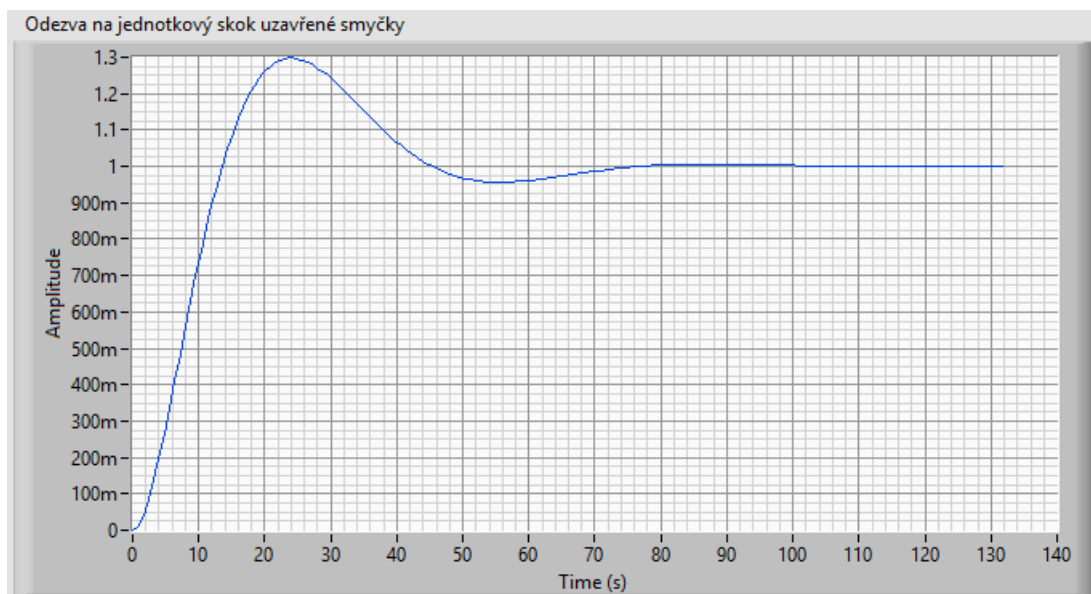
Pomocí ovládacích prvků v pravé dolní části programu můžeme nastavovat jednotlivé parametry regulátoru, které se ihned promítají do přenosu uzavřené smyčky. Rovnou zde vidíme rovnici výsledného návrhu regulátoru, který si poté hned můžeme ověřit na reálném modelu. Časové konstanty tohoto regulátoru jsou uvedeny v **sekundách**, kdežto pro reálný systém je pak potřeba časové konstanty přepočítat, protože regulátory použité v programu mají časové konstanty v **minutách**.

Ventilátor - termistor (T1)

Pomocí metody frekvenčních charakteristik jsme navrhli pro tuto soustavu vhodný PI regulátor na fázovou bezpečnost 45° . K tomuto návrhu jsme využili programu Matlab a jeho návrhového nástroje sisotool. Pomocí tohoto nástroje jsme si vykreslili frekvenční charakteristiku otevřené smyčky. Změnou hodnot složek P a I u regulátoru jsme jej nastavili pro námi zvolenou fázovou bezpečnost. Při návrhu jsme dbali na doporučení spojená s návrhem regulátorů pomocí frekvenčních charakteristik. Pro soustavu jsme volili menší zesílení proporcionální složky, protože při větším zesílení začal ventilátor dosahovat svých hraničních mezí a výsledný reálný systém jevil jako nestabilní. Výsledná přenosová funkce regulátoru je tedy:

$$F_{rv}(p) = 40\left(1 + \frac{1}{10.8p}\right) \quad (5.9)$$

Navržený regulátor jsme si odzkoušeli v námi vytvořeném návrhovém studiu, kde jsme si ověřili, že fázová bezpečnost je skutečně 45° a přechodové děje se shodují s přechodovými ději zobrazenými v programu Matlab. Na obr. 5.17 můžeme vidět simulovanou přechodovou charakteristiku navrženého regulátoru.



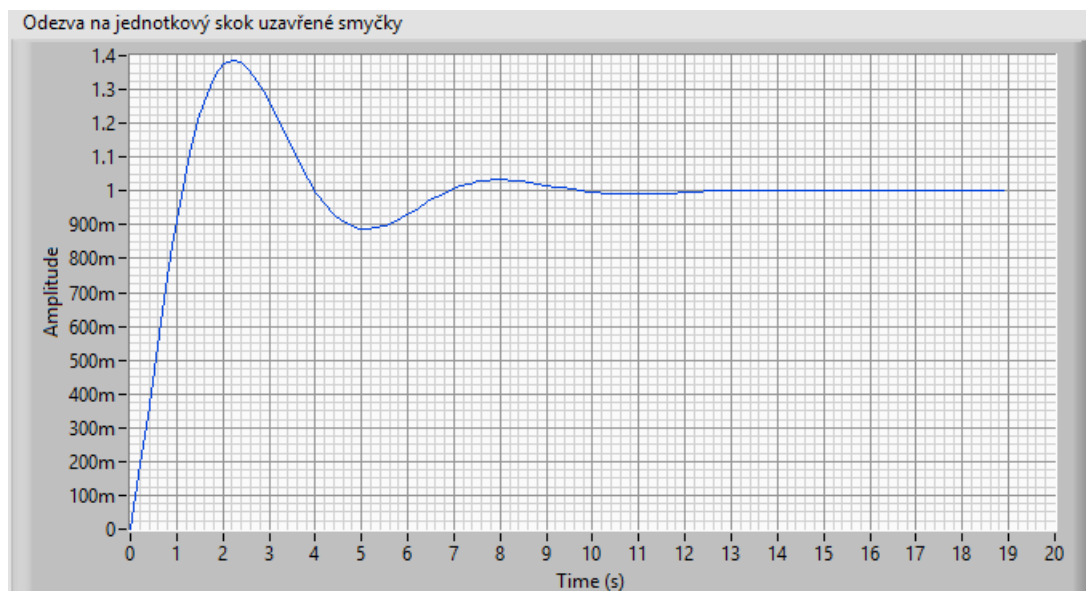
Obr. 5.17: Simulovaná odezva na jednotkový skok řízení pro soustavu ventilátor - termistor (T1)

Žárovka - termistor (T1)

Pro tuto soustavu byl navržen vhodný PI regulátor pomocí odezvy na jednotkový skok řízení. U tohoto regulátoru je možné zvolit nekonečné zesílení. S ohledem na soustavu a opotřebení žárovky byla zvolena hodnota $K_p = 58$. Pokud bychom zadali příliš velké zesílení, regulátor se začne chovat jako relé bez hystereze a začal by nabývat maximální a minimální hodnoty. Přenos navrženého regulátoru je

$$F_{rz}(p) = 58\left(1 + \frac{1}{6p}\right) \quad (5.10)$$

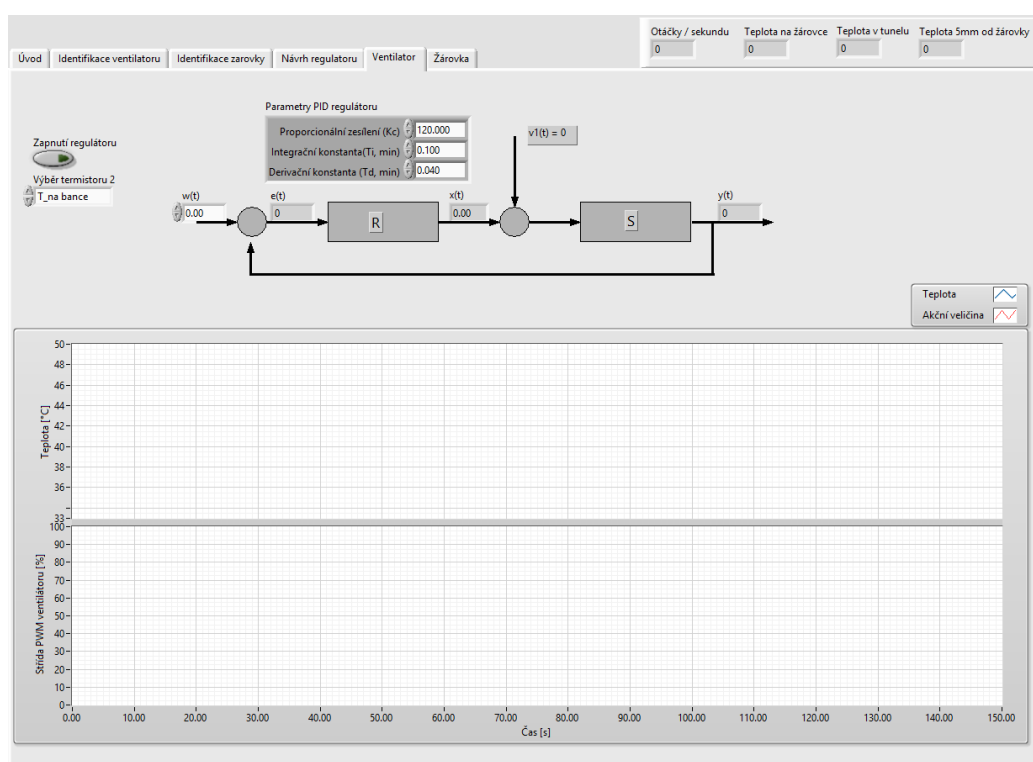
tento regulátor má fázová bezpečnost 40° . Na obr. 5.18 můžeme vidět odezvu na jednotkový skok řízení, který jsem získali pomocí simulace.



Obr. 5.18: Simulovaná odezva na jednotkový skok řízení pro soustavu žárovka termistor (T1)

5.2.5 Regulace teploty pomocí ventilátoru

Po přepnutí na záložku *Ventilátor* se na žárovce nastaví napětí 12V. Na obr. 5.19 vidíme čelní panel pro regulaci teploty pomocí ventilátoru. Můžeme zde vidět základní schéma řízení, kde jsou zobrazeny všechny potřebné hodnoty, jako řídicí veličina, regulační odchylka, akční veličina a výstup z regulátoru. Výstupní a akční veličina jsou ještě doplněny grafy pro lepší přehled. Jakmile sepneme tlačítko *Zapnutí regulace*, aktivujeme regulátor, u kterého lze za chodu nastavit dílčí konstanty jednotlivých složek. Potom stačí na vstup zadat žádanou hodnotu a v grafu sledovat průběh regulované veličiny, popřípadě akční veličiny.



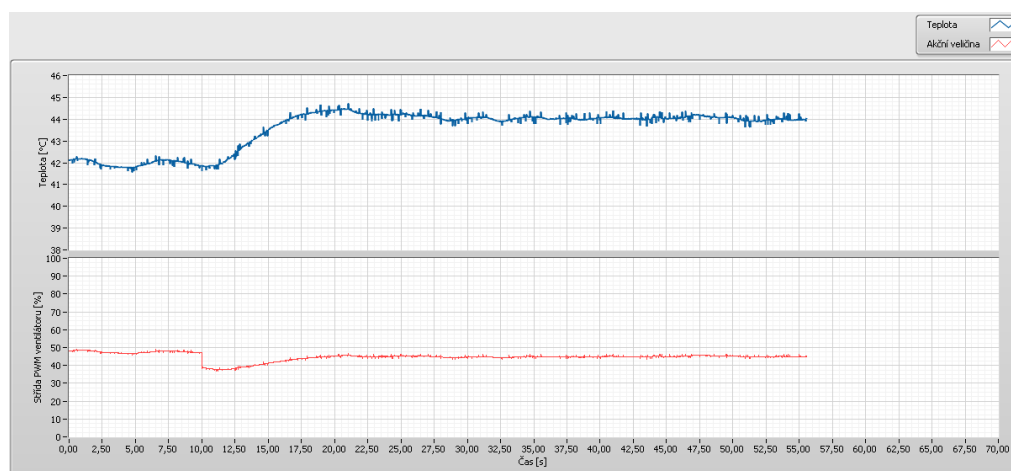
Obr. 5.19: Čelní panel pro řízení teploty pomocí ventilátoru

Pro řízení je zde použit *Teplotní regulátor*, který najdeme jako samostatný blok v programu Labview. Tento regulátor se vyznačuje tím, že reaguje na vstupní signál převráceným akčním zásahem, to znamená, že když žádaná hodnota bude menší než výstupní hodnota, regulátor bude svůj akční zásah snižovat a naopak. Tento regulátor využívá zápis jako v rovnici 5.6.

Do tohoto regulátoru se přivádí na vstup *žádaná teplota* a *aktuální teplota*. Na výstupu z regulátoru je použita změna rozsahu tak, aby akční zásah odpovídal roz-

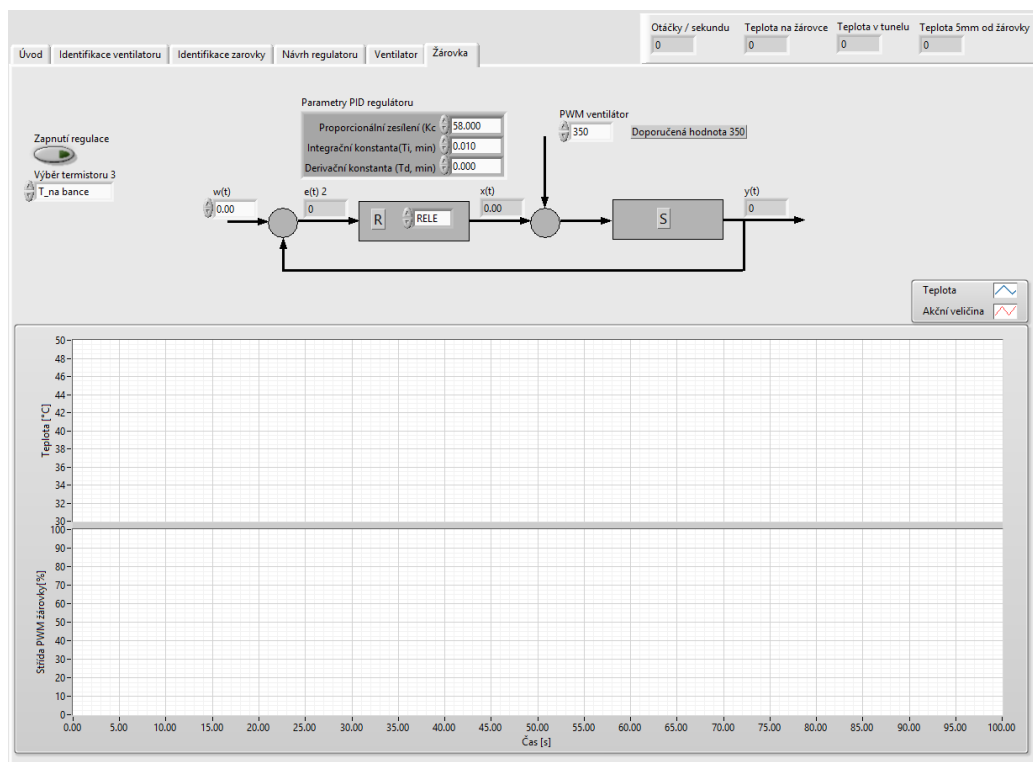
sahu signálu PWM. U ventilátoru je střída nastavena na 0.25 - 0.7. Hodnota 0.25 je zvolena, protože při nižší úrovni střídý PWM signálu se ventilátor úplně zastaví a pro jeho opětovné rozjetí je nutná hodnota střídý PWM signálu minimálně 0,55. To by mělo za následek nulovou odezvu ventilátoru na akční veličinu po jeho úplném zastavení.

Hodnoty navrženého regulátoru si nyní nastavíme u skutečného modelu a zapneme regulaci. Po nastavení žádané hodnoty začne regulátor reagovat a nastaví výstup na požadovanou hodnotu. Na obr. 5.20 můžeme vidět odezvu na skok řízení.



Obr. 5.20: Naměřená přechodová charakteristika pro soustavu ventilátor - termistor (T1)

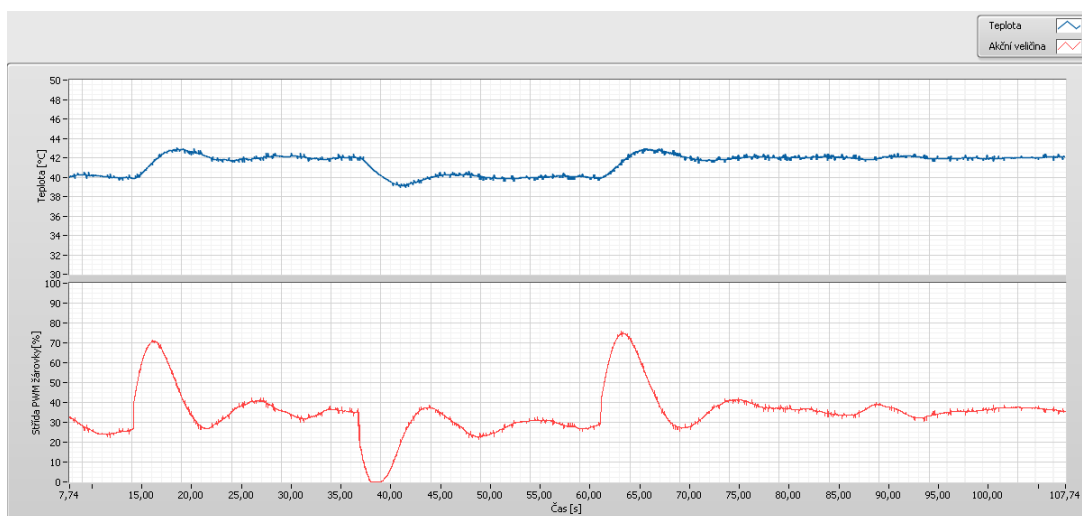
5.2.6 Regulace teploty pomocí žárovky



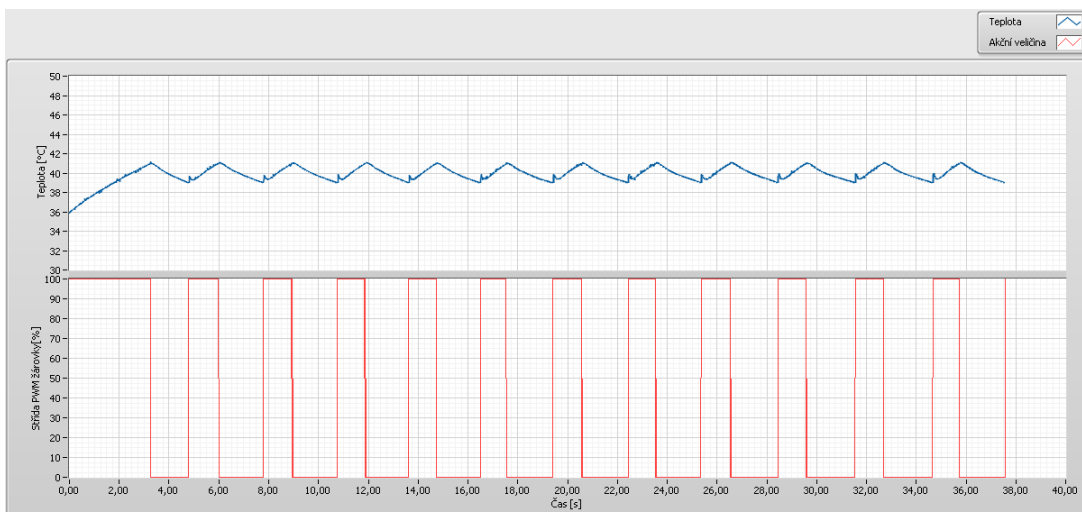
Obr. 5.21: Čelní panel řízení teploty pomocí žárovky

Čelní panel pro regulaci teploty pomocí žárovky je podobný jako u regulace teploty pomocí ventilátoru, jak můžeme vidět na obr. 5.21. Také je zde zobrazeno základní schéma řízení se všemi hodnotami. Rozdílné je však v tom, že zde můžeme použít 2 různé typy regulátorů. První typ regulátoru je PID. U něho můžeme jednotlivé složky vyřadit a tím dostat jednodušší typy regulátorů. Do regulátoru zadáme hodnoty jednotlivých složek, které jsme získali při návrhu regulátoru a ověřili v simulaci. Na obr.5.22 můžeme potom vidět chování soustavy s navrženým regulátorem. V čase $T = 16\text{ s}$ jsme na soustavu přivedli skokovou změnu řízení ze 40°C na 42°C , v čase $T = 38\text{ s}$ jsme tuto změnu vrátili. V čase $T = 62\text{ s}$ jsme opět udělali skok na 42°C a nechali teplotu ustálit delší dobu. Průběh teploty odpovídá výsledkům, kterých jsme dosáhli v simulaci.

Při použití releového regulátoru můžeme nastavit, zda ho použijeme s hysterezí nebo bez ní. U hystereze můžeme volit její velikost. Nastavíme tedy na regulátoru velikost hystereze 1. Průběh výstupní veličiny je zobrazen na obr. 5.23. Žádaná teplota zde je nastavena na 40°C . Výsledná hodnota poté nabývá hodnot od 39°C do 41°C .



Obr. 5.22: Průběh teploty pro soustavu žárovka - termistor (T1)



Obr. 5.23: Regulaci teploty pomocí releového regulátoru

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo realizovat propojení mezi přípravkem a vstupně výstupními moduly systému CompactRIO. Vytvořit uživatelské prostředí pro práci s tunelem a navrhnout laboratorní úlohy.

K propojení přípravku a systému CompactRIO byla navržena deska plošných spojů. Na této desce jsou implementovány filtry a napěťové děliče, které jsou použity pro detekci a filtraci napětí z termistoru. Dále je zde zapojení enkodéru i s napájením diody a tranzistoru. Nakonec je zde připojení PWM signálů k ovládání žárovky a ventilátoru.

Pro ovládání tunelu jsme v programovacím prostředí Labview vytvořili uživatelskou aplikaci, která provede uživatele od identifikace soustav, přes návrh regulátoru až po odzkoušení regulátoru na skutečném modelu.

V přípravku můžeme identifikovat dvě soustavy. První je žárovka - termistor. Kdy změnou střidy PWM signálu na vstup žárovky měníme teplotu na baňce žárovky. U této soustavy je ještě zavedená porucha ve formě ventilátoru, na kterém je nastavena PWM se střidou 0,35. Tato porucha nám slouží k rychlejšímu ochlazení žárovky a tím také k její linearizaci. Tuto soustavu jsme identifikovali jako soustavu prvního řádu bez dopravního zpoždění 5.3. Druhá soustava je ventilátor - termistor. U této soustavy přivedeme na žárovku PWM signál se střidou jedna. Změnou střidu PWM signálu na ventilátoru ochlazujeme baňku žárovky, na které poté měříme pomocí termistoru teplotu. Tato soustava vyšla jako soustava druhého řádu 5.2. Pro identifikaci obou soustav můžeme dostávat různé hodnoty v závislosti na době používání tunelu a změně okolní teploty.

Pro identifikované soustavy jsme navrhli vhodné regulátory. Jelikož soustava žárovka - termistor vyšla prvního řádu, zvolili jsme pro tuto soustavu regulátor PI. Tímto regulátorem jsme docílili nulové ustálené odchylky. Tento regulátor jsme navrhli na fázovou bezpečnost 40° . Odchylka od ustálené hodnoty v reálném průběhu 5.22 je způsobená nevyfiltrovaným šumem na termistorech, kterou regulátor bere jako poruchu a snaží se ji vyregulovat. Pro druhou soustavu ventilátor - termistor jsme navrhli PI regulátor pomocí frekvenčních charakteristik. Výsledný reálný průběh výstupní veličiny 5.20 má rychlejší ustálení, než nám vyšlo v simulaci. Navrhnutý regulátor má totiž v přechodové charakteristice menší překmit pod žádanou hodnotu, to se nám v reálném průběhu nezobrazí opět z důvodů malého šumu na výstupu termistoru.

Posledním bodem práce bylo navrhnout úlohu pro předmět řízení a regulace. Navrženou úlohu najdeme v příloze. Úloha se skládá z identifikace soustavy žárovka - termistor (T1), návržení vhodného regulátoru na požadovaný překmit, fázovou bezpečnost a odzkoušení tohoto regulátoru na přípravku. Studenti si také můžou odzkoušet releový regulátor a porovnat tak, který regulátor je pro řízení teploty vhodnější.

LITERATURA

- [1] CompactRIO Integrated Systems with Real-Time Controller and Reconfigurable Chassis NI cRIO-907x. National Instruments [online]. 2012, 2012-01-25 15:55:54.0 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-354/lang/cs>
- [2] NI 9206. National Instruments [online]. 2010, 2010-02-09 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-191/lang/cs>
- [3] NI 9401. National Instruments [online]. 2010, 2010-02-10 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-86/lang/cs>
- [4] NI 9505. National Instruments [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/202711>
- [5] Motor Driver 24v23 CS. POLOLU [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.pololu.com/catalog/product/1456>
- [6] BEJČEK, L.: Měření neelektrických veličin. Skriptum, VUT Brno, 1988
- [7] FPGA. National Instruments [online]. [cit. 2012-12-31]. Dostupné z: <http://www.ni.com/fpga/>
- [8] RTOS. VUTBR [online]. 2012 [cit. 2012-12-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www-base/priloha.php?dpid=65661>
- [9] VYORALOVÁ, J. Experimentální ověření metod návrhu konvenčních regulátorů při řízení laboratorního modelu teplovzdušného tunelu. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [10] BLAHA, P. a P. VAVŘÍN. Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní. Skriptum. VUT Brno.
- [11] ŠOLC, F., P. VÁCLAVEK a P. VAVŘÍN. Řízení a regulace II: Analýza a řízení nelineárních systémů. Skriptum. VUT Brno.
- [12] BOBÁL, V. Identifikace systému. Brno : VUT, 1990. 242 s. ISBN 80-214-0125-7.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

PWM pulzní šířková modulace

DIR směr otáčení motoru

F_{s1} přenos soustavy ventilátoru

F_{s2} přenos soustavy žárovky

F_r obecný popis regulátoru

F_{rz} přenos regulátoru žárovky

F_{rv} přenos regulátoru ventilátoru

SEZNAM PŘÍLOH

A ÚLOHA 1	47
A.1 Zadání	47
A.2 Teoretický rozbor	48
A.3 Vypracování	50
B Obsah přiloženého CD	53
C Propojení CompactRIA a modelu	54

A ÚLOHA 1

Pomocí programu *Tunel.exe* proveďte identifikaci soustavy žárovka - termistor (T1) a navrhnete vhodné parametry regulátoru PID pro tuto soustavu

A.1 Zadání

- 1, Z přechodové charakteristiky tunelu identifikujte soustavu žárovka - termistor (T1)
- 2, Pomocí metody návrhu regulátoru z přechodové charakteristiky navrhnete vhodný regulátor pro tuto soustavu. Regulátor navrhnete tak, aby jeho překmit byl zhruba 40%, měl nulovou ustálenou odchylku a jeho fázová bezpečnost byla 40° . Svůj návrh si nejdříve odzkoušejte na simulaci.
- 3, Navržený regulátor vyzkoušejte na fyzickém modelu tunelu
- 4, Na této soustavě si vyzkoušejte také releový regulátor a porovnejte výsledky s navrženým regulátorem z bodu 2.

A.2 Teoretický rozbor

Identifikace z přechodové charakteristiky

Na obrázku A.1 vidíme přechodovou charakteristiku systému prvního řádu s dopravním zpožděním, kde jednotlivé konstanty představují:

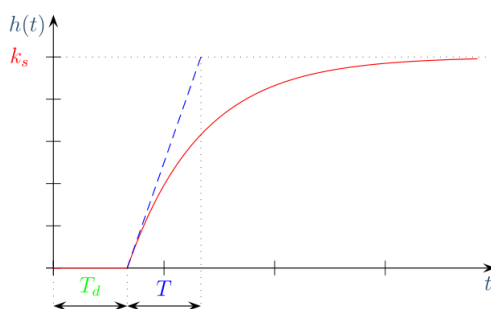
k_s je zesílení

T_d je dopravní zpoždění

T je doba náběhu

Potom se dá tedy přenos soustavy zapsat jako:

$$F(p) = \frac{k_s}{Tp + 1} e^{-T_d p}$$



Obr. A.1: Přechodová charakteristika systému prvního řádu[10]

Regulátory

Regulátor působí pomocí akční veličiny na soustavu tak, aby byla regulační odchylka co nejmenší[10]. U regulátoru nás nejčastěji zajímá návrh ústředního členu. Regulátor může obsahovat například výkonový zesilovač, měřicí člen a převodník vstupní veličiny. Tyto členy mají většinou standardní vlastnosti dané konstrukcí. Z hlediska dynamiky se jedná o proporcionální členy a nejčastěji je zahrnujeme do přenosu soustavy. V praxi se používají regulátory složené z těchto tří složek: proporcionální (P), integrační (I), derivační (D). Z těchto složek můžeme poskládat různé typy regulátorů od nejjednodušších až po regulátor PID. U regulátoru PD a PID musíme dát pozor na to, aby byla zajištěna realizovatelnost, proto volíme realizační časovou konstantu, která je o 2 řády větší, než jsou časové konstanty v čitateli regulátoru.

P-regulátor Jedná se o nejjednodušší regulátor, kde je akční veličina přímo úměrná velikosti regulační odchylky. Nevýhodou tohoto regulátoru je, že nezajišťuje

nulovou ustálenou odchylku pro nenulovou konstantní žádanou hodnotu u statických soustav, stejně jako poruchu. Vztah mezi akční veličinou a regulační odchylkou je přímo úměrný, platí tedy:

$$x(t) = r_0 e(t)$$

Přenosová funkce

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)} = r_0 = K_R$$

I-regulátor Použitím I složky v regulátoru dostaneme nulovou regulační odchylku i poruchu. Nevýhodou je zhoršení dynamických vlastností regulátoru a zpomalení přechodového děje.

Vztah pro časový průběh

$$x(t) = r_i \int_0^t e(t) dt + x(0)$$

Přenosová funkce

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)} = \frac{r_i}{p} = \frac{1}{T_i(p)}$$

PI-regulátor Jak můžeme vidět, v PI regulátoru jsou zastoupeny 2 složky, proporcionální a integrační. Integrační složka v regulátoru nám zajišťuje nulovou ustálenou odchylku.

Časový průběh:

$$x(t) = r_0 e(t) + r_i \int_0^t e(t) dt + x(0)$$

Přenosová funkce:

$$F_R(p) = \frac{X(p)}{E(p)} = r_0 + \frac{r_i}{p} = k_r \frac{T_r p + 1}{p} = \frac{T_r p + 1}{T_i p}$$

Vztahy mezi konstantami pro různé formy přenosu

$$k_r = r_i = \frac{1}{T_i} \quad T_r \frac{r_0}{r_i} \quad r_0 = \frac{T_r}{T_i}$$

Releový regulátor Jedná se o typ regulátoru, jehož akční veličina nabývá buďto maxima nebo minima. Velice často se tento typ regulátoru používá při řízení teploty. Pokud je požadovaná teplota menší, než aktuální teplota, relé je v sepnutém stavu a naopak. Pokud bychom takto řídili reálný systém, pak vlivem náhodných šumů z okolí při stavu, kdy požadovaná hodnota se rovná hodnotě výstupní, by relé začalo rychle kmitat. Proto je lepší použít relé s hysterezí.

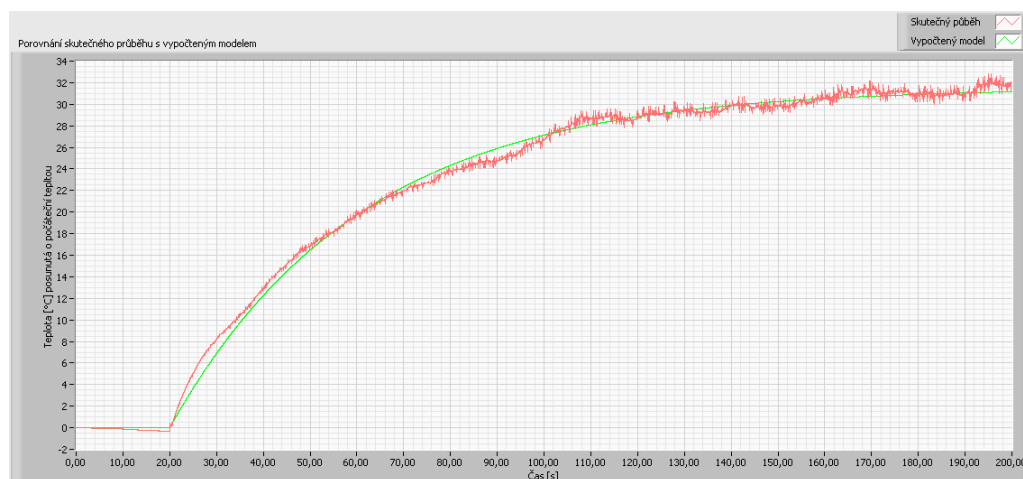
A.3 Vypracování

Atd 1,

Zapněte program *TUNEL.exe*, který naleznete na ploše Vašeho PC. Přepněte si do záložky *Identifikace žárovka* a pomocí prvku *Výběr termistoru* si vyberte termistor na baňce žárovky. Počkejte, až se teplota na baňce žárovky ustálí. Tuto teplotu zadejte do pole *Počáteční teplota* a klikněte na tlačítko *Spustit identifikaci*, po čase $t = 200s$ se vykreslí přechodová charakteristika. Aktuální průběh měření můžeme vidět v grafu *Vykreslení aktuálních hodnot*. Z této přechodové charakteristiky odhadněte řád soustavy, který zadáte do prvku *Řád soustavy* a celý postup opakuje. Výsledná naměřená data si z obou grafů exportujte do programu Excel a to tak, že kliknete pravým tlačítkem myši na graf a zvolte možnost *Export to Excel*. V poli model - indikátor se nám zobrazí přenos soustavy zapsaný v polynomicím tvaru. Tento tvar si opište pro další práci.

Jak je vidět z obr A.2, jedná se o soustavu prvního řádu, jejíž časová konstanta má velikost $T = 35.5$ a zesílení $K = 0.54$. Přenosová funkce soustavy má tedy tvar:

$$F_{s2}(p) = \frac{0.54}{35.5p + 1} \quad (\text{A.1})$$



Obr. A.2: Průběh naměřených hodnot a vypočtené soustavy žárovka - termistor (T1)

Atd2,

Přepneme si do záložky *Návrh regulátoru*. Zde si nejdříve zadáme přenos soustavy, jehož rovnice musí být ve tvaru polynomu. Tento tvar již dostaneme z identifikace systému, a proto není třeba jej přepočítat. Po zadání přenosu soustavy se nám v

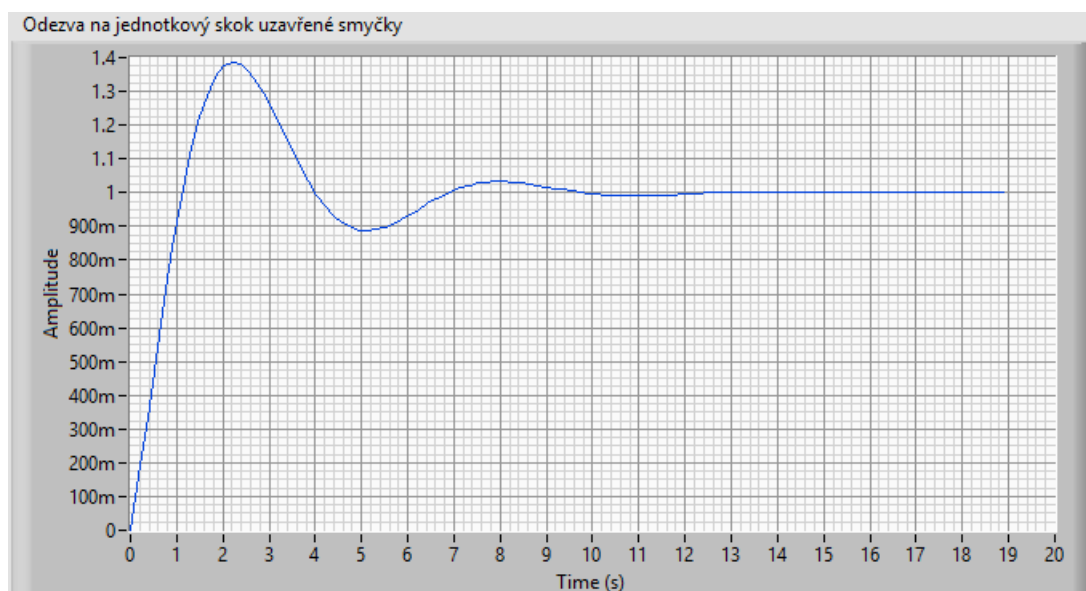
levém horním grafu *Odezva na jednotkový skok soustavy* vykreslí přechodová charakteristika. Pod tímto grafem je umístěn druhý graf *Odezva na jednotkový skok řízení uzavřené smyčky*. V tomto grafu můžeme vidět přenos uzavřené smyčky soustavy s regulátorem. Dále je zde zobrazen *Nyquistův diagram*, fázová a amplitudová bezpečnost. Pro návrh regulátoru použijeme zápis regulátoru

$$F_r(p) = Kc(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{\alpha T_d p + 1})$$

Pro tuto soustavu byl zvolen PI regulátor. Díky jeho integrační složce v regulátoru dosáhneme nulové ustálené odchylky. Jelikož se jedná o soustavu prvního řádu, je u tohoto regulátoru možné zvolit nekonečné zesílení. S ohledem na soustavu a opotřebení žárovky byla zvolena hodnota $K_p = 58$. Pokud bychom zadali příliš velké zesílení, regulátor se začne chovat jako relé bez hystereze a začal by nabývat maximální a minimální hodnoty. Integrační časovou konstantu volíme tak, aby průběh nebyl moc kmitavý. Přenos navrženého regulátoru je

$$F_{rz}(p) = 58(1 + \frac{1}{6p}) \quad (\text{A.2})$$

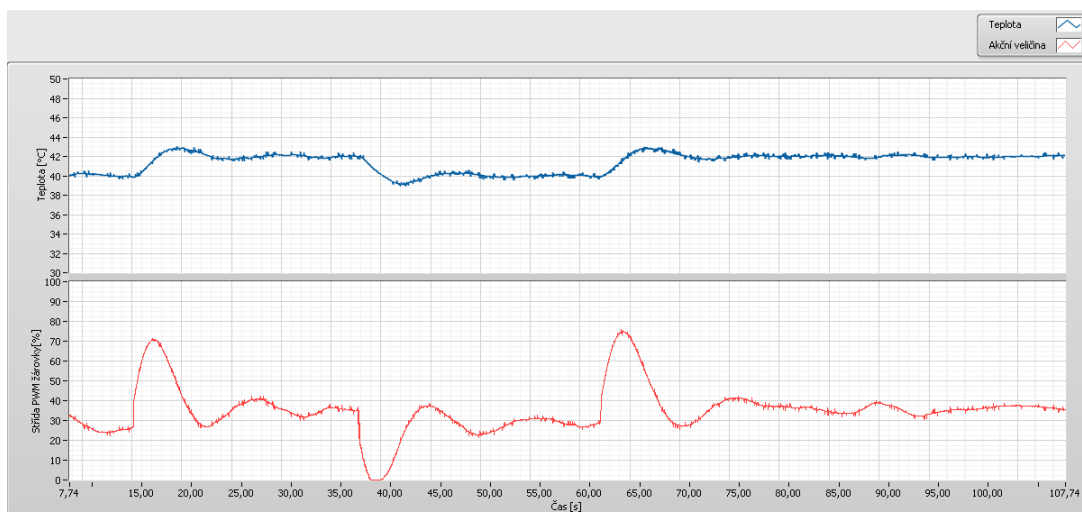
tento regulátor má fázová bezpečnost 40° . Na obr.A.3 můžeme vidět odezvu na jednotkový skok řízení, který jsem získali pomocí simulace.



Obr. A.3: Simulovaná odezva na jednotkový skok řízení pro soustavu žárovka termistor (T1)

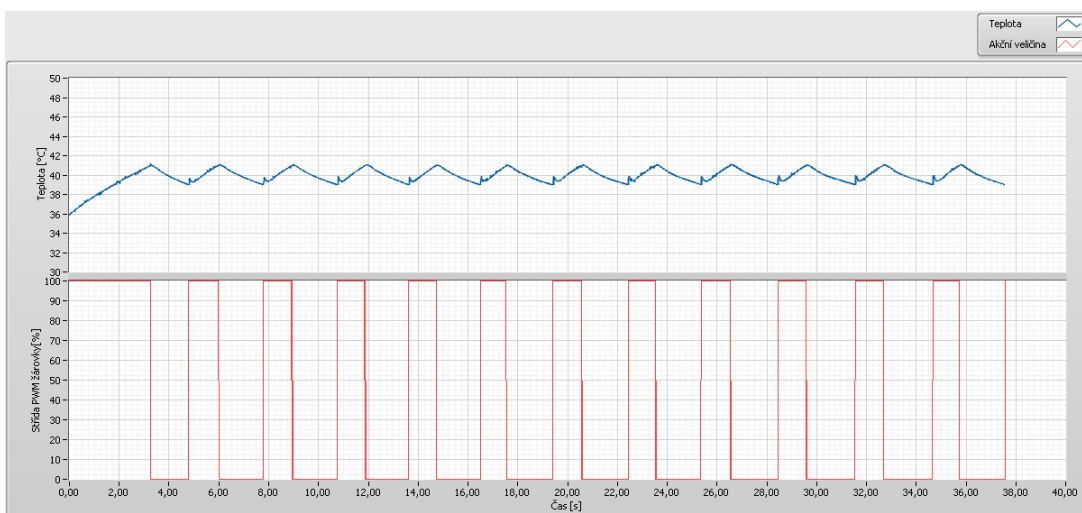
Atd3, Přepneme si do záložky *Žárovka*. Na čelním panelu je zobrazeno základní schéma řízení se všemi hodnotami. Ve schématu řízení v poli regulátoru si můžeme

vybrat 2 různé typy regulátorů. První typ regulátoru je PID. Do regulátoru zadáme hodnoty jednotlivých složek, které jsme získali při návrhu regulátoru a ověřili v simulaci. Na obr.A.4 můžeme potom vidět chování soustavy s navrženým regulátorem. V čase $T = 16\text{ s}$ jsme na soustavu přivedli skokovou změnu řízení ze 40°C na 42°C , v čase $T = 38\text{ s}$ jsme tuto změnu vrátili. V čase $T = 62\text{ s}$ jsme opět udělali skok na 42°C a nechali teplotu ustálit delší dobu. Průběh teploty odpovídá výsledkům, kterých jsme dosáhli v simulaci. Po naměření dat přepneme typ regulátoru na RELE.



Obr. A.4: Průběh skutečné teploty pro soustavu žárovka - termistor (T1)

U tohoto regulátoru si nastavíme hysterezi 1 a nastavíme žádanou veličinu. Na obr. A.5 můžeme vidět průběh výstupní veličiny.

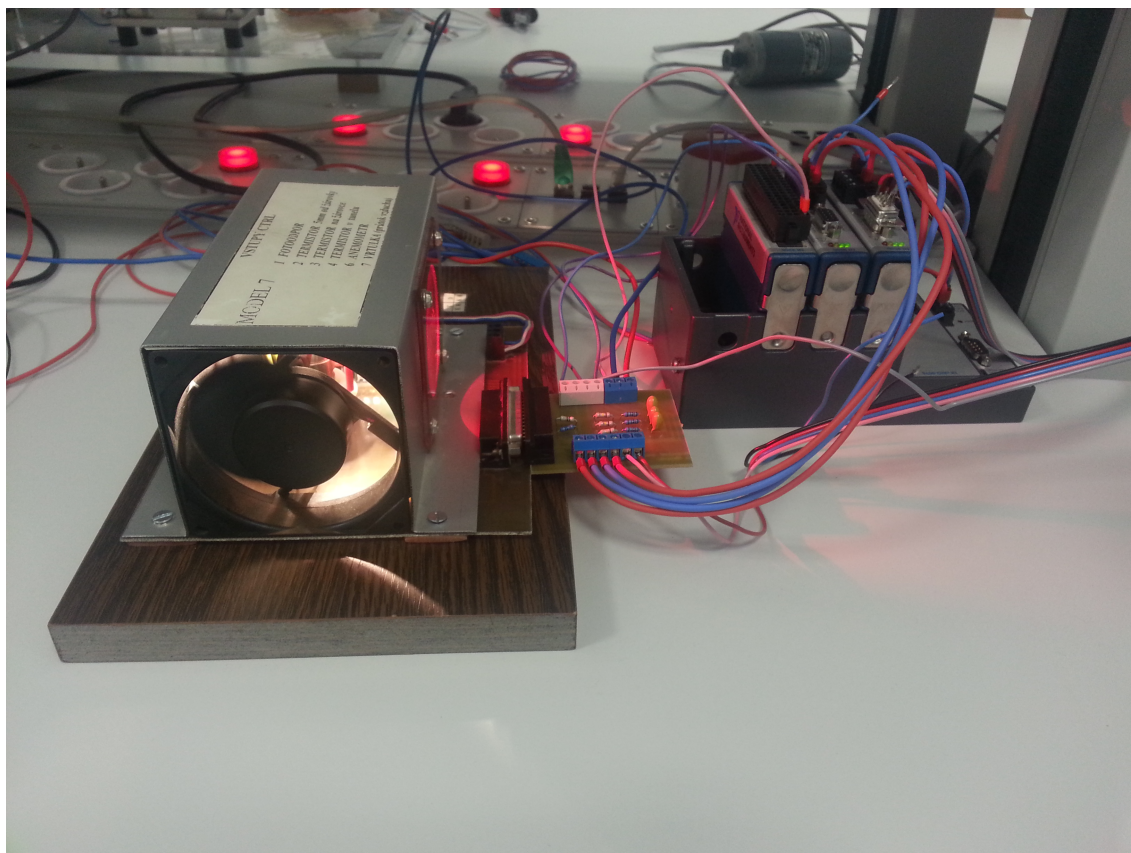


Obr. A.5: Rele

B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- Bakalářská práce Řízení horkovzdušného tunelu
- Projekt Tunel v programu Labview
- Aplikace Tunel.exe
- Návrh desky plošného spoje v programu Eagle

C PROPOJENÍ COMPACTRIA A MODELU



Obr. C.1: Propojení oídícího systému CompactRIO s modelem tunelu